

**CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE LA CUENCA DEL ARROYO
DE LA CARRERA 65**

LAUREN CASTILLO FIELD

DANIELA SOTO OROZCO

CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA

2017

**CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE LA CUENCA DEL ARROYO
DE LA CARRERA 65**

LAUREN CASTILLO FIELD

DANIELA SOTO OROZCO

TRABAJO DE GRADO

ASESORES

MSc. JORGE ENRIQUE GONZÁLEZ CONEO

Msc. GERALD LEONIDAS MESTRA RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA

2017



CORPORACION UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN Y APROBACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

El día 24 de marzo de 2017 se da aprobación al trabajo de grado evaluado por los jurados (Ingenieros Civil, Magister. Armando Fontalvo Lascano docente investigador de la Corporación Universidad de la Costa CUC y el Ingeniero Civil Magister Camilo Osorio García Empresario de "AQUA estudios y diseños ingeniería SAS" y docente catedrático de la Corporación Universidad de la Costa CUC., presentado por el estudiante relacionado a continuación:

Trabajo de grado	Estudiantes	Identificación	Tutores
CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE LA CUENCA DEL ARROYO DE LA CARRERA 65	LAUREN CASTILLO FIELD	1045736476	JORGE GONZALEZ CONEO Y GERALD MESTRA RODRIGUEZ
	DANIELA SOTO OROZCO	1140881134	

Certificamos que el **PROYECTO** ha sido evaluado, y ha obtenido la calificación de:

4.5 y ha cumplido técnica y metodológicamente, teniendo en cuenta las siguientes escalas:

Laureada _____

Meritoria X

Aprobada _____

Reprobada _____

Se firma el presente en la ciudad de Barranquilla, a los 24 días del mes Marzo de 2017.

Atentamente;

ARMANDO FONTALVO LASCANO

Jurado 1

CAMILO OSORIO GARCIA

Jurado 2

CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN	13
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. OBJETIVOS.....	17
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. DELIMITACIONES.....	18
4.1 DELIMITACIÓN TEMPORAL	18
4.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	18
5. LIMITACIONES.....	20
6. MARCO REFERENCIAL.....	21
6.1 MARCO TEÓRICO	21
6.1.1 Cuenca hidrológica.....	21
6.1.2 Ciclo hidrológico.	21
6.1.3 Canales abiertos.	26
6.1.4 Flujo uniforme.....	28
6.1.5 Tránsito distribuido de crecientes.....	31
6.1.6 Modelo de tormenta EPASWMM.....	32
6.1.7 Calibración.	34
6.1.8 Criterio de la estabilidad al deslizamiento.	35

6.1.9 Correlación lineal.....	38
6.2 ESTADO DEL ARTE (ANTECEDENTES Y TEORIAS BÁSICAS DEL PROBLEMA)	40
6.3 FORMULACIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	44
6.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	47
6.5 MARCO HISTÓRICO	47
6.6 MARCO GEOGRÁFICO	52
6.7 MARCO LEGAL.....	53
7. DISEÑO METODOLÓGICO.....	56
8. DESARROLLO DEL TRABAJO	58
8.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	58
8.2 DESCRIPCIÓN DE MODELO BASE A CALIBRAR.....	69
8.3 CONSTRUCCIÓN DE HIETOGRAMAS Y SERIES TEMPORALES	69
8.4 GEOREFERENCIACIÓN NODOS DE CONCENTRACIÓN	74
8.5 DEFINICIÓN DE EVENTOS.....	75
8.6 DETERMINACIÓN CAUDALES TEÓRICOS.....	76
8.7 RANGO DE VALORES DE NIVELES EN ESTUDIO	79
8.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	81
8.9 CALIBRACIÓN DEL MODELO	82
9. RESULTADOS OBTENIDOS.....	84
9.1 HIDROGRAMAS OBTENIDOS.....	88
9.2 AJUSTE DE CAUDALES OBTENIDOS.....	92
9.3 COMPARACIÓN RESULTADOS INICIALES VS RESULTADOS OBTENIDOS AL REALIZAR AJUSTE	93
10. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	98

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
12. RECURSOS.....	106
13. CRONOGRAMA	107
14. PRESUPUESTO.....	108
REFERENCIAS	109

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Delimitación área de estudio.....	19
Ilustración 2. Ciclo Hidrológico.....	22
Ilustración 3. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía.....	37
Ilustración 4. Arroyos durante evento de lluvia.. ..	48
Ilustración 5. Proyectos de canalización de arroyos en Barranquilla.	51
Ilustración 6. Ubicación municipio de Barranquilla.....	52
Ilustración 7. Barra de comandos principales	59
Ilustración 8. Barra vertical de comando principal MAPAS	60
Ilustración 9. Visualización de comando principal MEDIDAS	61
Ilustración 10. Barra vertical de comando principal MEDIDAS	62
Ilustración 11. Opción filtrar por de barra vertical, comando principal MEDIDAS ..	63
Ilustración 12. Opción evento de barra vertical, comando principal MEDIDAS.....	64
Ilustración 13. Opción fecha de barra vertical, comando principal MEDIDAS.....	64
Ilustración 14. Visualización de comando principal INFORMES.....	65
Ilustración 15. Barra vertical de comando principal INFORMES.....	66
Ilustración 16. Paso a paso para generar informe	67

Ilustración 17. Resultados de medidas para ejemplo.....	68
Ilustración 18. Modelo con tres pluviómetros	71
Ilustración 19. Opción para introducir series temporales	72
Ilustración 20. Datos de hietograma en SWMM.....	72
Ilustración 21. Hietograma en SWMM	73
Ilustración 22. Cuadro de información en SWMM de pluviómetro 1	74
Ilustración 23. Georeferenciación arroyo	75
Ilustración 24. Gráfica de patrón de crecimiento en niñas	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones de Saint Venant	31
Tabla 2. Arroyos significativos de la ciudad de Barranquilla	50
Tabla 3. Información de nodos de concentración	60
Tabla 4. Datos de precipitaciones 04 Nov 2015 en pluviómetro 1	70
Tabla 5. Datos para Hietograma	71
Tabla 6. Valores del coeficiente de rugosidad n	77
Tabla 7. Radio hidráulico para diferentes niveles.	78
Tabla 8. Relación yv^2 - Condición de estabilidad	80
Tabla 9. Cálculo de error SWMM vs Manning 23 de Julio 2015	84
Tabla 10. Cálculo de error SWMM vs Manning 11 de Sept de 2015	84
Tabla 11. Cálculo de error SWMM vs Manning 17 de Sept 2015	85
Tabla 12. Cálculo de error SWMM vs Manning 18 de Sept 2015	85
Tabla 13. Cálculo de error SWMM vs Manning 23 de Sept 2015	86
Tabla 14. Cálculo de error SWMM vs Manning 30 de Sept 2015	86
Tabla 15. Cálculo de error SWMM vs Manning 25 de Oct 2015	87
Tabla 16. Cálculo de error SWMM vs Manning 04 de Nov 2015	87
Tabla 17. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 23 de Julio 2015.....	93
Tabla 18. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 11 de Sept 2015.....	93

Tabla 19. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 17 de Sept 2015.....	94
Tabla 20. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 18 de Sept 2015.....	94
Tabla 21. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 23 de Sept 2015.....	95
Tabla 22. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 30 de Sept 2015.....	96
Tabla 23. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 25 de Oct 2015	96
Tabla 24. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 04 de Nov 2015.....	97
Tabla 25. Cronograma de actividades	107
Tabla 26. Presupuesto del proyecto	108

RESUMEN

Barranquilla es una de las ciudades más afectadas a nivel nacional por los altos volúmenes de escorrentía superficial que drenan por sus calles. A medida que aumenta la población, dicho problema también lo hace, debido la impermeabilización de sus zonas. A raíz de esta problemática, que arrastra consigo otras más, se han tomado algunas medidas momentáneas e iniciativas de investigación para cada cuenca con el fin de encontrar soluciones definitivas que eliminen cualquier consecuencia negativa. El “ARROYO DE LA SEGUNDA BRIGADA” pertenece a una de ellas; basados en esta investigación, se plantea la estimación de caudales a partir del modelo de los estudiantes José Arrieta Turizo y Yesid Fernández Córdoba con datos experimentales de precipitaciones que han sido registrados con ayuda de RfreeNet Web Manager, herramienta suministrada por la Ingeniera Melissa Acosta; para ser comparados con los caudales teóricos estimados por medio de Manning; a partir de esto se analizaran todos los parámetros que intervienen en él, de tal forma que se identifiquen las variables más sensibles para calibrar y validar el mismo. Convirtiéndose de esta forma en una herramienta segura y eficiente para la toma de soluciones para la problemática de este arroyo.

PALABRAS CLAVES: ESCORRENTÍA SUPERFICIAL, CAUDALES, VARIABLES, CALIBRAR, VALIDAR.

ABSTRACT

Barranquilla is one of the cities most affected at national level by the high volumes of superficial runoff that drain through streets. As the population increases, this problem also does so, due to the waterproofing of their areas. As a result of this problem, that brings with it others, cause this some measures and researches initiative have been taken for each basin to find definitive solutions that eliminate any negative consequence. "THE ARROYO OF THE SECOND BRIGADE" belongs to one of them; based on this research, we take the decision to propose the estimation of flows from the mode of the students Jose Arrieta Turizo and Yesid Fernandez Cordoba with experimental rainfalls data that have been registered with the help of Rfreenet Web Manager, a tool supplied by the Ing. Melissa Acosta; to be compared with the stimated theoretical flows through Manning, from this will analyze all the parameters involved in it, so that the most sensitive variables are identified to calibrate and can validate it. Becoming a safe and efficient tool for taking solutions to the problems of this stream.

KEY WORDS: SURFACE RUNOFF, FLOW RATES, VARIABLES, CALIBRATE, VALIDATE.

0. INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano de la ciudad de Barranquilla se ha caracterizado por el alto índice de invasiones y crecimiento predio a predio, algo que puede denominarse como no planificado; hasta hace pocos años se han tomado en serio las medidas establecidas en el plan de ordenamiento territorial (POT). Esta falta de interés tanto por los entes gubernamentales como por la ciudadanía en general ha traído consecuencias que afectan todos los ámbitos del desarrollo ciudadano.

El resultado más visible de esta falta de planeación han sido los altos volúmenes de escorrentía superficial que drenan por las calles de Barranquilla, comúnmente denominados arroyos; por lo que ante una lluvia torrencial toda la dinámica de la ciudad se ve paralizada, ya que estos representan una amenaza tanto para la vida humana como para las actividades comerciales que sufren pérdidas materiales.

En este proyecto se analizará el arroyo de la carrera 65 a través de la calibración de un modelo hidráulico creado por medio de la herramienta EPA-SWMM, que con una base de datos provenientes de pluviómetros instalados por la Universidad de la Costa CUC a lo largo del cauce del arroyo nos permitirá verificar la veracidad de dicho modelo, convirtiéndose en una herramienta importante para la predicción de posibles caudales y la toma de decisiones para la disminución de los mismos de manera efectiva.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El Distrito de Barranquilla cuenta con las cuencas hidrográficas del Río Magdalena y la Ciénaga de Mallorquín, con el sistema de caños orientales y los arroyos que hoy son objeto de contaminación hídrica como vertederos de aguas residuales sin procesar y de residuos sólidos por parte de particulares. (Concejo de Barranquilla, 2016).

Este problema se origina debido al crecimiento acelerado de los volúmenes de escorrentías, uno de los factores que inciden en dicha problemática es el fuerte impacto de los fenómenos de origen hidrometeorológicos, ya que en Barranquilla se dan largos periodos de sequía, pero los cortos periodos donde es interrumpida se despliegan lluvias torrenciales de poca duración y gran intensidad. Así mismo, las condiciones topográficas que han dividido la ciudad en las dos cuencas anteriormente mencionadas disminuyen los tiempos de concentración, con lo que se incrementan los caudales máximos de estas. Otro factor determinante es el crecimiento acelerado de la población, que no deja otra alternativa que buscar la manera de ofrecer infraestructuras, que siendo construidas con poca planificación generan cada vez más espacios impermeables, afectando directamente el ciclo hidrológico, donde es menor la infiltración y evapotranspiración que se produce y mayores los volúmenes de escorrentía; además en el proceso de constitución de la ciudad nunca se tuvo en cuenta un sistema de alcantarillado pluvial que mitigara los impactos de la urbanización.

Ante todos estos factores que agravan la problemática planteada, es necesario contar con una herramienta que tenga en cuenta los agentes que la ocasionan y permita estimar su comportamiento; de esta manera ¿Cómo predecir adecuadamente el comportamiento hidráulico del arroyo de la carrera 65 para diferentes eventos de precipitaciones?

2. JUSTIFICACIÓN

El balance hídrico de la ciudad de Barranquilla se ha visto afectado por diversos factores que disminuyen las salidas del recurso e incrementan cada vez más las entradas al entorno. Las fuertes intensidades con pocas duraciones que se presentan, sumadas a la urbanización poco planificada que sólo genera espacios menos permeables, disminuyen los índices de infiltración de las cuencas ocasionando que casi todos los volúmenes que caen como precipitación se conviertan en precipitación neta, es decir, escorrentía superficial.

Las escorrentías superficiales provenientes de las subcuencas localizadas en el DEIP al no encontrar espacios naturales hacia donde drenar deciden hacer las calles de la ciudad su cauce principal, afectando la dinámica de la población y atentando en contra de bienes materiales y de la vida de muchos ciudadanos.

El estudio de la hidrología ha permitido el cálculo de caudales picos mediante métodos conservadores como el Racional, Soil Conservation Service (SCS) y Clark, los cuales, a pesar de ser utilizados tradicionalmente, realizan una modelación poco exacta, que no permite conocer comportamientos ante cambios súbitos de las condiciones. Como se mencionó anteriormente, la ciudad de Barranquilla específicamente la cuenca del arroyo de la carrera 65 objeto de estudio del presente proyecto de investigación, es vulnerable al constante cambio de condiciones, lo que da como resultado un aumento considerable en los caudales, de acuerdo a lo planteado se requiere del estudio de su comportamiento a partir de un modelo hidráulico-hidrológico que ajustado a las características hidráulicas, topográficas y ambientales de la cuenca, tenga en cuenta los factores involucrados y sus posibles variaciones; para lograr este objetivo se hace necesaria su calibración y respectiva validación con lo que se podrá analizar y tratar de predecir dicho comportamiento ante diferentes escenarios, permitiendo así plantear soluciones eficientes, económicas y acordes a las situaciones más críticas que mitiguen o controlen los daños ocasionados por los volúmenes de escorrentía superficial.

Solo a través del estudio profundo de cada cuenca y sus respectivas subcuencas se podrán establecer soluciones verdaderamente eficientes, como las que ya se han venido dando en la ciudad a través de la canalización de algunos arroyos, aunque cabe destacar que existen otras alternativas poco comunes a nivel nacional que pueden ser implementadas a largo plazo.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y calibrar un modelo hidráulico- hidrológico de la cuenca del arroyo de la carrera 65, creando una herramienta para la evaluación del comportamiento del arroyo ante diferentes eventos de precipitación.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico hidrológico de la cuenca del arroyo de la carrera 65.
- Desarrollo de un modelo hidráulico- hidrológico para la cuenca del arroyo de la carrera 65.
- Calibrar el modelo hidráulico- hidrológico de la cuenca del arroyo de la carrera 65.

4. DELIMITACIONES

4.1 DELIMITACIÓN TEMPORAL

El presente proyecto de investigación se desarrolló en un período de 15 meses, el cual inició en Diciembre del 2015 y finalizó en Febrero del 2017.

4.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL

El proyecto de investigación se desarrolló en el departamento del Atlántico, exactamente en la ciudad de Barranquilla.

La corriente principal de la cuenca en estudio inicia en la carrera 32 con calle 70 esquina y desemboca en el río Magdalena, abarcando sitios importantes de la ciudad como la segunda brigada del ejército nacional, universidades: Universidad de la Costa CUC, Universidad Simón Bolívar, entre otros.

La delimitación del área de estudio se tomó del trabajo de investigación (Montero & Sánchez, 2015), donde se realizó también la subdivisión de la cuenca mediante el programa Arcgis con ayuda de levantamiento topográfico.



Ilustración 1. Delimitación área de estudio.

FUENTE: (Montero & Sánchez, 2015).

Para tener un poco más de claridad del entorno de estudio se presenta a continuación una breve descripción de cada subcuenca.

- **Subcuenca 1.** Esta subcuenca tiene un área de 130 hectáreas, empieza desde la calle 70 con carrera 32 y termina en la calle 65 con carrera 38, presenta una pendiente de 1.3 y en su mayoría es área impermeable.
- **Subcuenca 2.** Esta subcuenca tiene un área de 162 hectáreas, empieza desde la calle 65 con carrera 38 y termina en la calle 62 con carrera 47, presenta una pendiente de 0.93 y en su mayoría es área impermeable.
- **Subcuenca 3.** Esta subcuenca tiene un área de 246 hectáreas, empieza desde la calle 62 con carrera 47 y termina después de la vía 40 propiedad de la base naval, cuenta con una pendiente de 0.45 y en su mayoría es área impermeable.

5. LIMITACIONES

- El presente proyecto de investigación es la continuación de un estudio realizado por estudiantes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de la Costa, por lo que información como la topografía, el trazado de la corriente más larga, la infiltración, entre otras, han sido tomadas del proyecto ya mencionado.
- Los registros obtenidos por medio de RfreeNet Web Manager solo fueron tomados por un periodo aproximado de seis meses, de los cuales no se presentaron lluvias con mucha regularidad, sumado a esto los datos para la calibración y validación son bastante estrictos, aproximadamente 8 eventos. Así mismo, fueron escasos los días en que los pluviómetros estuvieron disponibles simultáneamente para registrar las precipitaciones, por lo que se ha asumido que los nodos sin registros tendrán los mismos datos del nodo más cercano, factor que disminuye la exactitud de los resultados.
- La ubicación de los pluviómetros 1 y 3 no fue la más adecuada, en estos puntos las secciones son muy irregulares por lo que no se puede evaluar de manera confiable el caudal a partir de la ecuación de Manning.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO TEÓRICO

6.1.1 Cuenca hidrológica.

Ven Te Chow (1994) describe la cuenca como aquella superficie en la cual el agua precipitada se transfiere a las partes topográficas bajas por medio del sistema de drenaje, concentrándose generalmente en un colector que descarga a otras cuencas aledañas, o finalmente al océano. La cuenca hidrológica, junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología. Desde el punto de vista de su salida existen dos tipos de cuencas: endorreicas (cerradas) y exorreicas (abiertas).

- En el primer tipo, el punto de salida se ubica dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago.
- En el segundo tipo, el punto de salida se localiza en los límites de la cuenca y a su vez la descarga se vierte en una corriente o en el mar.

6.1.2 Ciclo hidrológico.

En la Tierra, el agua existe en un espacio llamado hidrosfera, que se extiende desde unos quince kilómetros arriba en la atmósfera hasta un kilómetro por debajo de la biosfera o corteza terrestre.

El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. En la **Ilustración 2.** se muestra en forma esquemática cómo el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera: el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos: el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para

formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa. (Chow, 1994).

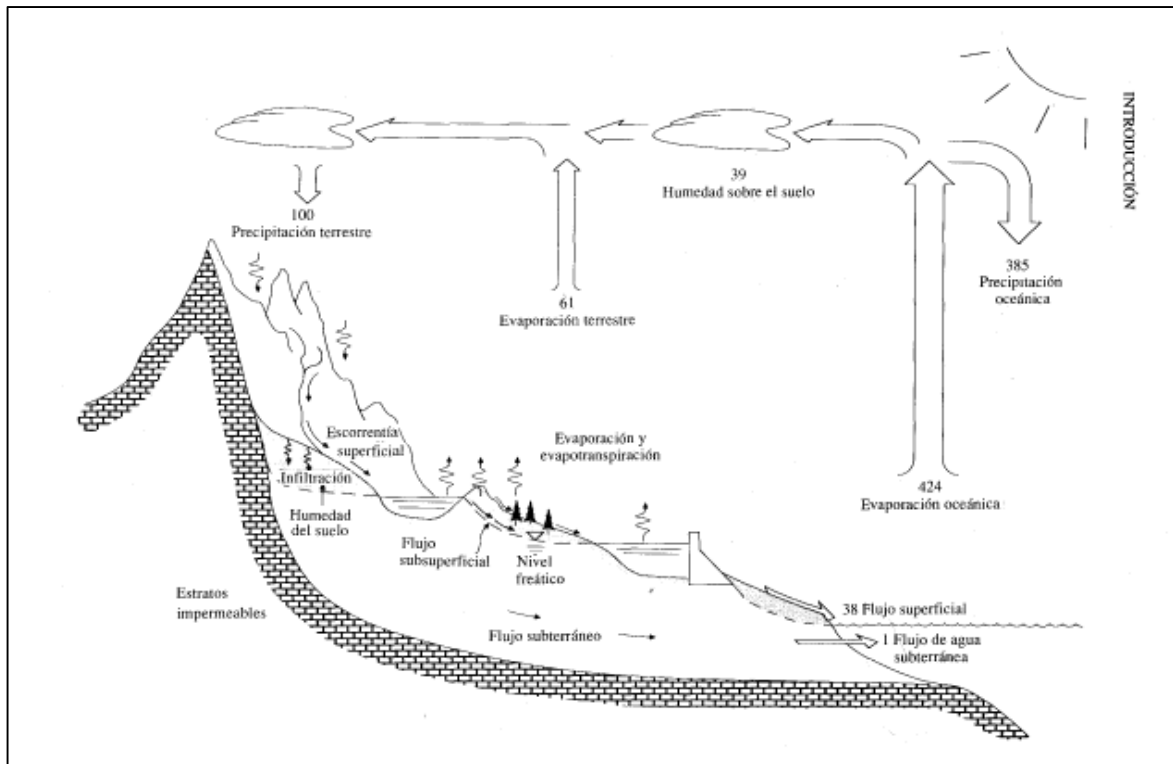


Ilustración 2. Ciclo Hidrológico.

FUENTE: EPA (2005).

6.1.2.1 Precipitación.

Es la principal fuente del agua que encontramos en la superficie. Puede presentarse en forma de lluvia, llovizna, granizo o nieve. Se mide en función de la altura de la lámina de agua que cae por unidad de área.

Debido a su calentamiento cerca de la superficie, motivado por diferencias de radiación, las masas de aire ascienden hasta alturas de enfriamiento suficientes

para llegar a la saturación. Pero esto no conlleva precipitación. Suponiendo que el aire está saturado, o casi saturado, para que se forme neblina o gotas de agua o cristales de hielo, se requiere la presencia de núcleos de condensación (en los dos primeros casos) o de congelamiento (en el tercero). Los núcleos de condensación consisten de productos de combustión, óxidos de nitrógeno y minúsculas partículas de sal; los núcleos de congelamiento consisten de minerales arcillosos, siendo el caolín el más frecuente.

Después de la nucleación se forman finísimas gotitas de diámetro medio de aproximadamente 0.02 mm y como las gotas de lluvia tienen un diámetro medio de aproximadamente 2 mm significa que se produce un aumento del orden de un millón de veces en el volumen de las gotitas. Este enorme aumento de tamaño se produce por la unión entre sí de numerosas gotitas y esta unión se explica por:

- la atracción electrostática entre las gotitas que conforman las nubes;
- las microturbulencias dentro de la masa de la nube;
- el barrido de las gotitas más finas por las gotas mayores;
- la diferencia de temperaturas: las gotas más frías se engrosan a expensas de las más calientes.

Lo que se acaba de exponer explica la formación de las gotas de lluvia dentro de la masa de la nube, pero esto no quiere decir que las gotas así formadas llegarán a la superficie terrestre, o, en otras palabras, que el volumen de agua contenido en la nube es igual al volumen de agua llovida. Mediciones realizadas demuestran que lo normal es que el agua de lluvia que cae a tierra sea mucho mayor que el agua retenida en la nube. La única explicación es que las nubes se rehacen continuamente durante el proceso mismo de la formación de las precipitaciones, lo que significa una alimentación constante a partir del vapor de agua de los alrededores; esto se produce principalmente:

- cuando existe una turbulencia dentro de la nube que provoca y facilita la renovación del vapor de agua;

- cuando hay movimiento del aire húmedo desde las partes bajas, es decir un movimiento vertical ascendente.

Las precipitaciones se clasifican en tres grupos, según el factor responsable del levantamiento del aire que favorece el enfriamiento necesario para que se produzcan cantidades significativas de precipitación.

a) Precipitaciones convectivas. Son causadas por el ascenso de aire cálido más liviano que el aire frío de los alrededores. Las diferencias de temperatura pueden ser sobre todo el resultado de calentamientos diferenciales en la superficie o en la capa superior de la capa de aire. La precipitación convectiva es puntual y su intensidad puede variar entre aquella correspondiente a lloviznas ligeras y aguaceros.

b) Precipitaciones orográficas. Resultan del ascenso del aire cálido hacia una cadena de montañas. Las regiones que quedan del otro lado de las montañas pueden sufrir la ausencia de lluvias," puesto que todas las nubes son interceptadas y precipitadas en el lado de donde ellas provienen.

c) Precipitaciones ciclónicas. Se producen cuando hay un encuentro de nubes de diferentes temperaturas: las más calientes son impulsadas a las partes más altas donde precipitan.

En la naturaleza, los efectos de estos tres tipos de enfriamiento están interrelacionados y la precipitación resultante no puede identificarse como de un solo tipo. (Chereque. s.f.).

Existen diferentes mecanismos para su registro: Pluviómetros, fluviógrafos, estaciones automáticas y radares.

6.1.2.2 Esgurrimiento.

Breña & Jacobo (2006) definen el esgurrimento como la porción de la precipitación pluvial que ocurre en una zona o cuenca hidrológica y que circula sobre o debajo de la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca o bien alimentar un lago, si se trata de cuencas abiertas o cerradas, respectivamente.

El esgurrimento se inicia sobre el terreno una vez que en la superficie se alcanza un valor de contenido de humedad cercano a la condición de saturación. Posteriormente se iniciará un flujo tanto sobre las laderas, como a través de la matriz de los suelos, de las fracturas de las rocas o por las fronteras entre materiales de distintas características, esto es, un flujo subsuperficial. En el primer caso, el flujo se incorporará a algún tributario del sistema de drenaje de la cuenca. En el segundo caso, parte del agua subsuperficial podrá percolar a sistemas más profundos, otra parte permanecerá como un almacenamiento temporal, y otra regresará a la superficie, donde eventualmente formará parte de los volúmenes que conducirán los diferentes cauces a zonas de menor altitud.

6.1.2.3 Infiltración.

La cantidad de agua que atraviesa la superficie del terreno por unidad de tiempo y se desplaza al subsuelo recibe el nombre de ritmo o tasa de infiltración. Si el agua que se introduce al terreno por la superficie se desplaza a mayor profundidad, entonces se dice que ocurre la percolación. Un porcentaje del agua infiltrada podrá desplazarse en forma lateral a través del material dispuesto abajo de la superficie del terreno, a lo que se denomina interflujo o flujo subsuperficial. El terreno puede estar formado por un medio poroso (como son los suelos), por roca consolidada fracturada, o por una combinación de ambos. Las características

particulares de cada uno de los medios que constituyen un terreno, influye en forma directa sobre el flujo del agua. (Chow,1994).

6.1.3 Canales abiertos.

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial.

Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la Tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas como canales abiertos naturales.

Las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares. En algunos casos pueden hacerse suposiciones empíricas razonablemente consistentes con las observaciones y experiencias reales, de tal modo que las condiciones de flujo en estos canales se vuelvan manejables mediante el tratamiento analítico de la hidráulica teórica. Un estudio completo sobre el comportamiento del flujo en canales naturales requiere el conocimiento de otros campos, como hidrología, geomorfología, transporte de sedimentos, etc. Éste constituye, de hecho, un tema de estudio por sí mismo, conocido como hidráulica fluvial.

Los canales artificiales son aquéllos contruidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano: canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas 'de drenaje, vertederos, canales de des-de, canaletas de madera, cunetas a lo largo de carreteras, etc., así como canales de modelos contruidos en el laboratorio con propósitos experimentales. Las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel

deseado o diseñadas para cumplir unos requisitos determinados. La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producirá, por tanto, resultados bastante similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseño. (Chow,1994).

6.1.3.1 Elementos geométricos de una sección de canal.

Chow (1994) afirma que los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad de flujo. Para secciones de canal regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección. Para secciones complicadas y secciones de corrientes naturales, sin embargo, no se puede escribir una ecuación simple para expresar estos elementos, pero pueden prepararse curvas que representen la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para uso en cálculos hidráulicos. A continuación, se dan las definiciones de varios elementos geométricos de importancia básica:

- **Profundidad de flujo, y :** es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre. A menudo este término se intercambia con la profundidad de flujo de la sección, d .
- **Ancho superficial, T :** es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **Área mojada, A :** es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.
- **Perímetro mojado, P :** es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.
- **Radio hidráulico, R :** es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

$$R = \frac{A}{P}$$

Ecuación 1. Ecuación radio hidráulico.

FUENTE: (Chow, *Hidráulica de canales abiertos.*, 1994).

- **Profundidad hidráulica, D:** es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

$$D = \frac{A}{T}$$

Ecuación 2. Ecuación profundidad hidráulica.

FUENTE: (Chow, 1994).

6.1.4 Flujo uniforme

Chow (1994) considera que el flujo uniforme tiene las siguientes características principales:

- a) La profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes.
- b) La línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos; es decir, sus pendientes son todas iguales, $S_f = S_v = S_o = S_b$.

Para propósitos prácticos, el requerimiento de una velocidad constante puede interpretarse libremente como el requerimiento de que el flujo posea una velocidad media constante. Sin embargo, en rigor, esto significaría que el flujo posee una velocidad constante en cada punto de la sección del canal dentro del tramo del flujo uniforme. En otras palabras, la distribución de velocidades a través de la sección del canal no se altera dentro del tramo. Se considera que el flujo uniforme es sólo permanente, debido a que el flujo uniforme no permanente prácticamente no existe. En corrientes naturales, aun el flujo uniforme permanente es raro, debido a que en ríos y corrientes en estado natural casi nunca se experimenta una condición estricta de flujo uniforme. A pesar de esta desviación de la realidad, a menudo se supone una condición de flujo uniforme para el cálculo de flujo en corrientes naturales. Los resultados obtenidos a partir de esta suposición son

aproximados y generales, pero ofrecen una solución relativamente simple y satisfactoria para muchos problemas prácticos. (Chow, 1994)

6.1.4.1 Ecuación de Chézy.

En 1769 el ingeniero francés Antoine Chézy desarrolló probablemente la primera ecuación de flujo uniforme, la famosa ecuación de Chézy, que a menudo se expresa como sigue:

$$V = C \sqrt{RS}$$

Ecuación 3. Ecuación de Chézy.

FUENTE: (Chow, 1994).

V es la velocidad media en pies/s, R es el radio hidráulico en pies, S es la pendiente de la línea de energía y C es un factor de resistencia al flujo, conocido como C de Chézy.

La ecuación de Chézy puede deducirse matemáticamente a partir de dos suposiciones. La primera suposición fue hecha por Chézy. Ésta establece que la fuerza que resiste el flujo por unidad de área del lecho de la corriente es proporcional al cuadrado de la velocidad; es decir, esta fuerza es igual a KV^2 , donde K es una constante de proporcionalidad. La superficie de contacto del flujo con el lecho de la corriente es igual al producto del perímetro mojado y la longitud del tramo del canal o PL. Luego la fuerza total que resiste al flujo es igual a KV^2PL .

La segunda suposición es el principio básico del flujo uniforme, el cual se cree que fue establecido por primera vez por Brahms en 1754. Ésta establece que en el flujo uniforme la componente efectiva de la fuerza gravitacional que causa el flujo debe ser igual a la fuerza total de resistencia. La componente efectiva de la fuerza gravitacional es paralela al fondo del canal e igual a $wAL \sin \theta = wALS$, donde w

es el peso unitario del agua, A es el área mojada, θ es el ángulo de la pendiente y S es la pendiente del canal. Entonces, $wALS=KV^2PL$. Si $A/P= R$ y $\sqrt{w/k}$ se remplazan por un factor C ; la ecuación anterior se reduce a la ecuación de Chézy. (Chow, 1994)

$$V = \sqrt{\left(\frac{w}{k}\right) \left(\frac{A}{P}\right) S} = C\sqrt{RS}.$$

Ecuación 4. Ecuación de Chézy a partir de suposiciones.
FUENTE: (Chow, 1994).

6.1.4.2 Ecuación de Manning.

En 1889 el ingeniero irlandés Robert Manning presentó una ecuación, la cual se modificó más adelante hasta llegar a su bien conocida forma actual:

$$V = \frac{1,49}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 5. Ecuación de Manning.
FUENTE: (Chow, 1994).

V es la velocidad media en pies/s, R es el radio hidráulico en pies, S es la pendiente de la línea de energía y n es el coeficiente de rugosidad, específicamente conocido como n de Manning. Esta ecuación fue desarrollada a partir de siete ecuaciones diferentes, basada en los datos experimentales de Bazin y además verificada mediante 170 observaciones. Debido a la simplicidad de su forma y a los resultados satisfactorios que arroja en aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se ha convertido en la más utilizada de todas las ecuaciones de flujo uniforme para cálculos de flujos de canales abiertos. (Chow, 1994).

6.1.5 Tránsito distribuido de crecientes.

El flujo de agua a través del suelo y de los canales en una cuenca es un proceso distribuido porque el caudal, la velocidad y la profundidad varían en el espacio a través de la cuenca.

Los modelos de tránsito distribuido de crecientes pueden utilizarse para describir la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca para producir el hidrograma de flujo a la salda de esta. Las ecuaciones de Saint-Venant, desarrolladas por primera vez por Barre de Saint-Venant en 1871, describen el flujo unidimensional no permanente en un canal abierto. (Chow, 1994).

Ecuación de continuidad

Forma conservativa
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Forma no conservativa
$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

Ecuación de momentum

Forma conservativa

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$$

Término de aceleración local	Término de aceleración convectiva	Término de fuerza de presión	Término de fuerza gravitacional	Término de fuerza de fricción
------------------------------------	---	------------------------------------	---------------------------------------	-------------------------------------

Forma no conservativa (elemento de ancho unitario)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$$

_____ Onda cinemática

_____ Onda de difusión

_____ Onda dinámica

* Despreciando flujo lateral, cortante por viento, pérdidas por corrientes de *eddy* y suponiendo que $\beta = 1$.

Tabla 1. Ecuaciones de Saint Venant.

FUENTE: (Chow, 1994).

6.1.6 Modelo de tormenta EPASWMM.

El Stormwater Management Model (modelo de gestión de aguas pluviales) de la (Environmental Protection Agency, 2005) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El módulo de transporte o hidráulico de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Asimismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

Estos modelos se basan en el desarrollo de ecuaciones diferenciales encargadas de modelar variación de caudal y nivel de un flujo en un espacio unidimensional y el tiempo de manera no permanente en canales abiertos. En general estas modelaciones se presentan en tres dimensiones, pero las aplicaciones prácticas suelen utilizar una aproximación unidimensional en la dirección de mayor relevancia, que usualmente suele ser a lo largo del canal en la dirección de flujo; pero esta a su vez tiene otras opciones que deben ajustarse para que los resultados se asemejen mucho más a la realidad. La onda dinámica se considera como el modelo de tránsito distribuido más completo existente, ya que tiene en cuenta todas las fuerzas que interactúan en el tránsito de la creciente (inerciales, presión, gravitacional, fricción) y tiene en cuenta los efectos de remanso en el cálculo; en su forma completa, estas ecuaciones se consideran de solución compleja aun con el uso de las más modernas herramientas computacionales. (Cea, 2008).

Este método reproduce los retardos y amortiguamientos que genera el tránsito dentro de la red. Es el método más completo para reproducir los fenómenos; sin embargo, su coste computacional puede ser alto. SWMM da tres opciones dentro de este modelo en dependencia al tratamiento de los términos inerciales de la

ecuación. La ecuación puede ser resuelta en su versión completa o reducirla al modelo de onda difusiva. La tercera opción es un término medio de las dos anteriores. (Rodríguez, 2013).

6.1.6.1 Características del modelo hidrológico Swmm.

EPA (2005) considera distintos procesos hidrológicos que se producen en la salida de las aguas urbanas. Entre éstos se encuentran:

- Precipitaciones variables en el tiempo.
- Evaporación de las aguas superficiales estancadas.
- Acumulación y deshielo de nieve.
- Intercepción de precipitaciones por almacenamiento en depresiones.
- Infiltración de las precipitaciones en capas del suelo no saturadas.
- Entrada del agua de la infiltración en acuíferos.
- Intercambio de flujo entre los acuíferos y el sistema de transporte.
- Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial.

6.1.6.2 Características hidráulicas.

Según EPA (2005), SWMM contiene un conjunto flexible de herramientas de modelación de características hidráulicas utilizado para analizar el flujo debido a la

escorrentía superficial y los aportes externos de caudal a través de una red de tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, y demás estructuras. Estas herramientas incluyen la capacidad de:

- Manejar redes de tamaño ilimitado.
- Utiliza una amplia variedad de geometrías para las conducciones, tanto abiertas como cerradas, así como los canales naturales.
- Modelar elementos especiales como unidades de almacenamiento y tratamiento, divisores de finjo, bombas, vertederos y orificios.
- Aplicar candiles estemos y concentraciones para determinar la calidad del agua de las aguas superficiales, intercambio de caudales con los acuíferos, caudales de infiltración en los colectores dependientes de la precipitación, caudales sanitarios en tiempo seco y aportes estemos definidos por el usuario.
- Realizar el análisis hidráulico por distintos métodos como el flujo uniforme, la onda cinemática o la modelación completa por onda dinámica.
- Modelar distintos regímenes de flujo, como pueden ser remanso, entrada en carga, flujo inverso y acumulación en superficie.
- Aplicar controles dinámicos definidos por el usuario para simular el funcionamiento de las bombas, la abertura de los orificios o la posición de la cresta de un vertedero.

6.1.7 Calibración.

SWMM permite comparar los resultados obtenidos en una simulación con mediciones tomadas en campo en sus gráficos de evolución temporal, para que

SWMM pueda utilizar dichos datos de calibración, estos deben introducirse en un archivo de texto con un formato especial y deben guardarse junto al resto del proyecto. (Environmental Protection Agency, 2005)

6.1.7.1 Archivos de calibración.

EPA (2005), menciona que los archivos de calibración contienen medidas de un solo parámetro en uno o varios puntos que pueden ser comparados con los resueltos de una simulación en un gráfico de evolución temporal. Se pueden utilizar distintos archivos para cada uno de los siguientes parámetros:

- Escorrentía superficial en una cuenca.
- Arrastre de contaminantes en una cuenca.
- Nivel de agua en un nudo.
- Caudal entrante en un nudo.
- Calidad del agua en un nudo.
- Caudal en una línea.

6.1.8 Criterio de la estabilidad al deslizamiento.

Ante la ausencia de otros criterios en los cuales se tenga en cuenta la velocidad de la escorrentía, se ha elaborado uno teniendo en cuenta la estabilidad de las personas ante la fuerza que ejerce el flujo sobre ella. Cuando es necesario cruzar una calle en la cual el flujo posee una velocidad y un calado determinados, uno tiene la incertidumbre de que si el agua podrá ser capaz de arrastrarnos o no. Para establecer dicho criterio, se planteará que la fuerza que ejerce el agua sobre

una persona sea tal que no provoque su deslizamiento y/o caída (**Ilustración 3**). La fuerza de arrastre del agua puede evaluarse como:

$$F_1 = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2$$

Ecuación 6. Fuerza de arrastre del agua.

Fuente: (Nania Escobar, 1999).

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, que depende básicamente de la forma de la superficie contra la cual choca el fluido, ρ la densidad del fluido, A la proyección frontal del área en donde actúa la fuerza del agua que es igual a $y \times b$, el calado por el ancho de la persona, en este caso de las piernas, v la velocidad del fluido. Por otro lado, suponiendo que la persona en cuestión pueda ser capaz de mantenerse en pie, la fuerza que debe equilibrarla es la de fricción del calzado sobre el suelo y que sería igual a:

$$F_2 = \mu P$$

Ecuación 7. Fuerza de fricción.

Fuente: (Nania Escobar, 1999).

Siendo μ el coeficiente de fricción, que depende de los materiales del calzado y del suelo y del estado de ambos, y P el peso de la persona. No se tiene en cuenta aquí el empuje vertical hacia arriba generado por el volumen líquido desalojado por la parte sumergida del cuerpo.

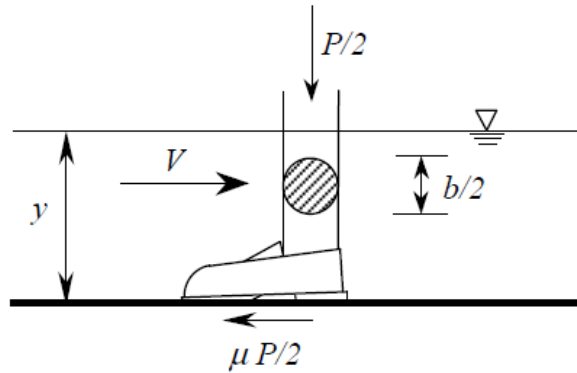


Ilustración 3. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía.

Fuente: (Nania Escobar, 1999).

Considerando que el coeficiente de arrastre para un cilindro de altura infinita es igual a 1,2 (Streeter, V.L; Wylie, E.B, 1979), la densidad del agua es de 1000 kg/m³, el ancho de las piernas $b = 0,1 \text{ m} \times 2 = 0,2 \text{ m}$, el peso de la persona de 60 kgf y el coeficiente de fricción entre caucho y hormigón húmedos igual a 0,50 (Gieck, 1981), con un coeficiente de seguridad de 2, para incluir el efecto del empuje y la posible variación de los parámetros considerados, la condición de estabilidad vendría dada por la siguiente desigualdad:

$$v^2 y \leq \frac{2\mu P}{C_d \rho B 2} = \frac{2 \cdot 0.5 \cdot 60 \cdot 9.81 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}}{1.2 \cdot 1000 \cdot 0.2 \cdot 2} = 1.23 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$$

Ecuación 8. Condición de estabilidad.

Fuente: (Nania Escobar, 1999)

El coeficiente de seguridad puede interpretarse aplicado al coeficiente de fricción, dada su incertidumbre por los distintos materiales y estados en los que pueden estar tanto el suelo como el calzado, o también al peso o ancho del peatón, ya que puede darse el caso de que el peso sea menor o el ancho de sus piernas mayor o que exista una combinación desfavorable de los tres factores. (Nania Escobar, 1999).

6.1.9 Correlación lineal.

Correlación significa analizar hasta qué punto es significativa la dependencia de una variable con la otra. De esta manera, por ejemplo, cuando exista una dependencia funcional entre ambas variables diremos que tenemos una correlación perfecta (ej. radio y área de un círculo). Cuando, por el contrario, no exista ninguna dependencia entre las variables diremos que no hay correlación (ej. primera letra del apellido y altura de un individuo). El caso más interesante es el Intermedio, cuando es posible que exista alguna correlación, aunque no perfecta, que habrá que cuantificar.

Nos vamos a concentrar aquí en un tipo particular de correlación que es la correlación lineal. Esta estudiará el grado en que la nube de puntos representada en el diagrama de dispersión se acerca a una recta.

Cuanto mejor se aproxime dicha nube a una recta, mayor será el grado de correlación lineal. De esta forma, el estudio de la correlación lineal está íntimamente ligado al de la regresión lineal. Distinguiremos dos tipos de correlación lineal. Cuando al crecer la variable x , la variable y tienda también a aumentar (pendiente positiva de la recta de regresión) diremos que tenemos una correlación positiva o directa. Cuando ocurra lo contrario, la correlación será negativa o inversa. (Gorgas, Cardiel, & Zamorano, 2011).

6.1.9.1 Coeficiente de correlación lineal.

“El coeficiente de correlación lineal r , se define como el cociente entre la covarianza y las desviaciones típicas (o raíces cuadradas de las varianzas) de x e y ”. (Gorgas, Cardiel, & Zamorano, 2011).

$$r = \frac{s^2_{xy}}{s_x s_y} = \frac{Cov}{s_x s_y}$$

Ecuación 9. Coeficiente de correlación lineal.

Fuente: (Gorgas, Cardiel, & Zamorano, 2011).

Respecto a los valores concretos del coeficiente de correlación podemos establecer los siguientes casos:

1. $r = 0$. En este caso, al ser la covarianza nula no existirá correlación. Además, las pendientes de las rectas de regresión de y sobre x y de x sobre y serán nulas, es decir sus orientaciones serán horizontal y vertical respectivamente.

2. $r = 1$. En este caso no habrá dispersión de los puntos respecto a la recta y todos se situarán sobre ella. Tendremos una dependencia funcional entre ambas variables y una correlación positiva, o directa, perfecta. Además las dos rectas de regresión (de y sobre x y de x sobre y) coincidirán.

3. $r = -1$. Al igual que en el caso anterior todos los puntos se situarán sobre la recta y la correlación será negativa, o inversa, perfecta.

4. $0 < r < 1$. En este caso, la correlación será positiva pero no perfecta. Evidentemente la correlación (y la covarianza) será mejor cuanto más se acerque r a 1.

5. $-1 < r < 0$. De la misma manera tendremos una correlación negativa tanto mejor cuanto más próximo esté r a -1 .

Así, un coeficiente de correlación próximo a ± 1 indica que casi todas las variaciones encontradas en y son explicadas por la recta (teniéndose una buena correlación), mientras que si r es 0, la recta de regresión apenas sirve para explicar las variaciones y la correlación lineal será pobre. (Gorgas, Cardiel, & Zamorano, 2011).

6.2 ESTADO DEL ARTE (ANTECEDENTES Y TEORIAS BÁSICAS DEL PROBLEMA)

Los caudales picos para diferentes cuencas ha sido un tema de gran debate a nivel mundial, debido a que son totalmente necesarios para el diseño de estructuras y soluciones de tipo hidráulicas y aun no existe una herramienta que simule de manera exacta sus comportamientos, a través del software SWMM se han modelado varias cuencas alrededor del mundo y aunque este tiene una alta flexibilidad en cuanto a la adaptación según los parámetros y tipos de tormentas no es del todo eficiente y necesitan ciertos ajustes con datos más específicos y de fuentes un poco más confiables. Para el desarrollo de la presente investigación ha sido necesaria la recolección de estudios y artículos que se direccionen a los mismos objetivos, por lo que se mencionarán algunos aspectos importantes de los mismos.

Según la CNR (1978), la calibración en modelos hidrológicos es el proceso mediante el cual los parámetros utilizados en el cálculo de las variables se hacen variar dentro de un rango físico posible hasta adquirir valores tales que las respuestas del modelo sean suficientemente registradas durante un periodo particular, y según determinados criterios de prueba; y la validación es el proceso en que, tratándose de modelos hidrológicos, se generan caudales mediante el modelo, durante un periodo distinto al usado en la calibración y del cual se dispone de caudales registrados para la misma sección, para así comprobar si en definitiva el modelo es capaz de generar aportación con un nivel adecuado de confiabilidad y precisión.

Según Schwar (1996), el objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre las respuestas reales del sistema y las respuestas simuladas por el modelo empleado.

Según Estrela (1988), la calibración se utiliza para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato directo, siendo una etapa en la que se busca que el modelo reproduzca con la mayor fidelidad el funcionamiento del sistema observado.

Según Tucci (1998), la optimización es la búsqueda del valor de una variable o de n variables, que proporcionen el mejor resultado para una función objetivo obedeciendo ciertas restricciones. Las técnicas iterativas de optimización son utilizadas para ajustar los parámetros de los modelos hidrológicos porque normalmente la función objetivo resultante del uso de estos modelos es implícita, es decir los parámetros a ser optimizados no forman parte explícitamente de la función objetivo.

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWMM EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE ALTA PENDIENTE EN COSTA RICA

AUTOR: MAIKEL MENDEZ MORALES

Se aplicó el modelo hidrológico SWMM a un caso de estudio que incluyó el análisis de dos cuencas hidrológicas en el área urbana de la ciudad de Cartago, Costa Rica. Para la optimización de parámetros, calibración y análisis de sensibilidad de SWMM, se utilizó la suite de calibración y optimización paramétrica PEST, la cual se fundamenta en los algoritmos de Gauss-Marquardt-Levenberg (GML).

En el proceso de calibración con PEST se utilizaron 10 eventos secuenciales de tormenta registrados por tres estaciones meteorológicas durante la estación lluviosa del año 2011. La evolución de los parámetros, junto con su sensibilidad relativa, fue analizada para cada evento seleccionado haciendo uso de los hidrogramas observados. El análisis de dichos eventos indica que tanto los parámetros como las sensibilidades relativas y, por ende, su importancia, cambian

en relación con la tipología de cada tormenta y con el régimen de precipitación del año hidrológico, lo cual a su vez indica que no existe un único set óptimo de parámetros que se adapte satisfactoriamente a todas las condiciones.

Los coeficientes de rugosidad de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable (n_{imp}), el flujo superficial sobre el área permeable (n_{per}) y el tránsito hidráulico (n_{cha}) resultaron los parámetros más sensitivos de todos, siendo estos últimos de carácter totalitario. El comportamiento de estos parámetros es parcialmente dependiente de la intensidad y volumen total de precipitación en relación con los usos y coberturas que dominan el espacio de cada cuenca analizada. Su comportamiento también sugiere que existe una profunda dependencia con respecto al estado de humedad antecedente del suelo y los estados de flujo hidráulico, tanto a nivel de superficie como de tránsito hidráulico. (Mendez, 2012)

CALIBRACIÓN DE DOS MODELOS DE SIMULACIÓN INTEGRAL DE CUENCA, PARA LA HOYA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PURAPEL, ESTACIÓN NIRIVILO.

AUTOR: MANUEL HERIBERTO SOTO BENAVIDES

TUTORES: ROBERTO PIZARRO TAPIA- MEDARDO AGUIRRE GONZALEZ.

En esta investigación se realizó la calibración para el modelo T y el modelo de Temez, donde hace mínima la función objetivo, proceso llevado a cabo por una “macro automática” incorporada en Excel 97 para ambos casos, con ayuda de procesos de ajustes números como el método de Newton, incorporado en la herramienta Solver de Excel 97 también.

En específico se menciona que los modelos de simulación integral de cuenca poseen la facultad de estimar series de aportaciones a partir de solo datos meteorológicos, pero que resulta de gran utilidad contar con modelos ajustados que permitan completar series históricas de caudales y además, puedan servir de

base en la planificación e implementación de acciones tendientes a una gestión adecuada a nivel de cuenca. Por otro lado, se realizan algunas recomendaciones como la necesidad de agregar nuevas variantes y nuevos parámetros a los modelos que simulen de mejor forma los eventos hidrológicos en el sistema; implementar en los modelos series de datos meteorológicos representativos de la zona a estudiar, por lo que sugieren un aumento de red meteorológica de la región, a fin de otorgar mayor confiabilidad en el proceso y uso de la información que de ella se obtenga.

Por ultimo potenciar y masificar el uso de modelos de simulación integral de cuenca para que, en base a metodologías probadas y factibles de ser implementadas, poder planificar y realizar una mejor gestión de los recursos hídricos en la región. (Soto, 2001)

MODELO HIDROLÓGICO- HIDRÁULICO PARA EVALUAR UN SISTEMA DE DRENAJE URBANO EN ZONAS PLANAS.

AUTOR: LUIS ALEJANDRO SANCHEZ

En este trabajo se empleó el Modelo Storm Water Management Model (SWMM) para evaluar el Drenaje Pluvial existente en la Avenida Ramón Antonio Medina, una de las principales vías de la ciudad. Se realizó el análisis hidrológico e hidráulico del funcionamiento del drenaje existente, para resolver las inundaciones en las adyacencias de la vía, producto de procesos urbanísticos como el cambio de uso del suelo. Se propuso una solución basada en incorporar nuevas captaciones como 11 sumideros de ventana ubicados a lo largo de la vía, 4 sumideros de reja en calzada ubicados en 3 de los sectores adyacentes y modificación en el diámetro del colector principal.

A pesar de que en La Ciudad de Coro no se dispone de datos de campo que permitan una adecuada calibración y validación de estos modelos, un análisis

comparativo de los gastos simulados en cada subcuenca, evidenció cierta concordancia entre el escurrimiento simulado por el modelo SWMM y las observaciones realizadas durante eventos lluviosos en las zonas críticas de la vía. No obstante, se propone estudiar alternativas que permitan instrumentalizar alguna de las subcuencas urbanas a fin de calibrar el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM), y validar su implementación en zonas con características topográficas similares a las de Coro. (Sánchez, 2009)

6.3 FORMULACIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **ALCANTARILLADO:** Sistema de transporte (tuberías, canales, etc.) utilizado para evacuar las aguas residuales desde su fuente de origen (lluvias, viviendas, industria, etc.) hasta la planta de tratamiento o hasta una corriente receptora.
- **ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD:** es el análisis que permite determinar cuán sensibles son los resultados del modelo a los cambios en sus parámetros.
- **ANCHO SUPERFICIAL:** es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **ÁREA DE DRENAJE:** Es el Área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica.
- **ÁREA MOJADA:** es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.
- **BALANCE HIDROLÓGICO:** Se relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento superficial y subterráneo y flujo de agua subterránea.
- **CAUDAL:** Cantidad de flujo de agua que pasa por un punto en un tiempo determinado.

- **CICLO HIDROLÓGICO:** se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida.
- **COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA:** Se define como relación entre la precipitación que se convierte en escorrentía superficial y la precipitación total, adimensional.
- **COEFICIENTE DE VARIACIÓN:** Es la relación que existe entre la desviación estándar y la media.
- **CONDENSACIÓN:** Transición del agua de la fase de vapor a la líquida.
- **CUENCA HIDROGRÁFICA:** una cuenca hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple.
- **DRENAJE:** Es la facultad que tienen los suelos para liberarse del exceso de agua lluvia, es decir para secarse. El drenaje está determinado por las características físicas del suelo como son la estructura, la textura, la permeabilidad y las características de las capas subyacentes, por la altura del agua freática y por el clima de la región.
- **ESCORRENTÍA:** parte de la precipitación que fluye por la superficie del terreno (escorrentía superficial) o por debajo de aquél (escorrentía subterránea).
- **EVAPORACIÓN DE AGUA:** Emisión de vapor de agua por una superficie libre a temperatura inferior a su punto de ebullición.
- **EVAPOTRANSPIRACIÓN:** Cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y por la transpiración de las plantas.
- **INFILTRACIÓN:** Formación de un paso de agua en forma de conducto a través de materiales naturales o artificiales, cuando las resultantes de todas

las fuerzas que actúan sobre las partículas del suelo tienen una componente vertical en sentido de la gravedad.

- **INTENSIDAD:** es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo, se expresa en mm/h.
- **INTERCEPCIÓN:** proceso por el cual la precipitación es detenida y retenida por la vegetación y estructuras, precipitación que se pierde por evaporación y transpiración antes de penetrar en el suelo.
- **PELIGRO:** evaluación de la intensidad máxima esperada de un evento destructivo en una zona determinada y en el curso de un período dado, con base en el análisis de probabilidades.
- **PERÍMETRO MOJADO:** es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.
- **PERÍODO DE RETORNO:** se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del n-ésimo evento de los (n) registros.
- **PRECIPITACIÓN:** agregado de partículas acuosas, líquidas o sólidas, cristalizadas o amorfas, que caen de una nube o grupo de nubes y alcanza el suelo.
- **PROFUNDIDAD DE FLUJO:** es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre. A menudo este término se intercambia con la profundidad de flujo de la sección, d.
- **RADIO HIDRÁULICO:** es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.
- **RECURSOS HÍDRICOS:** Son todas las fuentes de agua, representadas por los mares, ríos, lagos, embalses, aguas subterráneas, etc. que favorecen el desarrollo y la conservación de la vida en el planeta.

6.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

La construcción de modelos hidráulicos e hidrológicos a través de herramientas computacionales, permite la simulación del comportamiento de un arroyo ante diferentes eventos de precipitaciones, teniendo en cuenta una amplia variedad de parámetros que garantizan resultados confiables.

6.5 MARCO HISTÓRICO

La problemática de arroyos en Barranquilla no es un tema reciente, estas corrientes de agua formadas por las intensas y cortas lluvias características de la zona, han existido desde los inicios del municipio y se han ido vinculando a través del tiempo con su desarrollo urbanístico.

En el diccionario de hidrología y ciencias afines (De la Lanza, Cáceres, Adame, & Hernández, 1999) se define el término arroyo como un pequeño curso de agua o escurrimiento, de poca profundidad, por lo general de flujo discontinuo y en cierto modo turbulento. Rio poco caudaloso; pero claramente esta descripción para la cantidad de volúmenes de esorrentías presentados en la ciudad de Barranquilla es bastante conservadora.

Este evento y el aumento de sus consecuencias negativas han sido ocasionadas por la misma sociedad; el crecimiento poblacional acelerado que además se ha dado sin ningún tipo de planificación, no han dejado más alternativa que crear espacios urbanos que permitan tener unas condiciones dignas de vivienda, disminuyendo cualquier índice de infiltración, convirtiendo las calles de la ciudad en el cauce principal de las cuencas naturales y generando caos desde todos los aspectos en cada evento de lluvia.



Ilustración 4. Arroyos durante evento de lluvia.

FUENTE: *(El Heraldo, 2013).*

Es preciso mencionar otro factor influyente, el alcantarillado pluvial, este sistema para la ciudad es subterráneo, único y tiene muy poca cobertura. Las redes de drenaje conducen las aguas pluviales en forma paralela a la red de aguas negras hacia los cuerpos de agua sin recibir ningún tipo de tratamiento. Cuando llueve torrencialmente en la ciudad, parte de las aguas lluvias fluyen dentro de las tuberías rebasando su capacidad de evacuación. La acumulación de basuras generada por la falta de conciencia de muchos ciudadanos durante la temporada invernal, los bloqueos de las tuberías y las infiltraciones de las mismas provocan contaminación y derramamientos que aumentan los caudales.

Todas las propuestas presentadas por compañías tanto nacionales como internacionales, en su momento para crear el sistema y en estos instantes para su mejora y ampliación han sido rechazadas, algunas de ellas:

En el año 1920 HERBARD & COMPANY INC de Nueva York, presentaron una propuesta de pavimentación y alcantarillado pluvial al Concejo Municipal para dar solución a estos problemas, sin embargo, no fueron desarrollados estos programas por la mala situación financiera que atravesaba la ciudad.

Posteriormente, en 1956 la TOWN PLANNING COLABORATIVE estableció el primer plan regulador y recomienda la canalización de algunos arroyos, y por las mismas razones anteriores, se realizaron acciones conservadoras sobre esta problemática.

Entre las más recientes, encontramos que, en 1994, el Gobierno Municipal a través del alcalde Bernardo Hoyos, presentó una propuesta al gobierno canadiense con el objetivo de que este país realizara en Barranquilla el alcantarillado pluvial que se necesitaba.

En marzo del año 1997 se planteó un Estudio de Factibilidad y Diseño de Soluciones al Drenaje Pluvial de la ciudad de Barranquilla, por Fonade-Hidroestudios S.A y ConCEP Ltda. La propuesta se basa en medidas estructurales y medidas no estructurales con las cuales se busca prevenir el avance del problema en el futuro. Dicha propuesta se aleja de las anteriores en el sentido que para la vertiente oriental, la solución busca solucionar las consecuencias de las carencia de alcantarillado pluvial, sin dar énfasis a la construcción, parcial o total de un sistema convencional, atacando la principal consecuencia cual es la parálisis que se genera en la ciudad.

Ahora, con base a estas constataciones y a la necesidad de consolidar una estructura hidráulica que mitigue los efectos adversos con la entrada de la temporada invernal, creando condiciones favorables de coexistencia entre los habitantes del Distrito de Barranquilla y los sistemas de arroyos, la Administración Distrital estableció como uno de sus proyectos fundamentales y prioritarios la recuperación de los sistemas hídricos, delegando al Foro Hídrico, como garante de las actividades que converjan en la solución de planes, proyectos y programas que propendan por la recuperación ambiental y sistemática a la construcción, canalización y limpiezas del sistema de arroyos y sus afluentes que afectan y ponen en riesgo a una parte de la sociedad vulnerable a las consecuencias de estos devastadores arroyos. En estas últimas administraciones el Foro Hídrico ha

intervenido los arroyos de Santa María, Las Malvinas, Don Juan, Don Diego, Afán y la vía canal de Villa, El Salao, San Pedro, Arroyo León, etc. (Foro Hídrico, 2016)

Estas alternativas de solución en algunos casos ya se han finiquitado, como por ejemplo los arroyos de la Calle 84 y la Calle 79 que ya han pasado la prueba de algunos eventos bastante fuertes, pruebas que han sido superadas sin ningún inconveniente. Sin embargo, para la mayoría de la ciudad aún no se ha definido una salida contundente en lo que se refiere a una solución integral para el drenaje pluvial.

Los arroyos más significativos hasta el presente año son los siguientes:

Arroyo	Longitud (m)
Calle 94	1.408
Calles 91 y 92	4.186
Calle 84 (Intervenido)	5.200
Calle 76 (Intervenido)	5.163
Coltabaco	3.845
Arroyo Carrera 65	4.590
Felicidad (Contiene La María–Intervenido).	5.759
La Paz - Carrera 40	2.903
Hospital	3.754
Rebolo - Carrera 21 (En proceso de intervención).	4.826
Carrera 8	3.354
Don Juan	7.906
Salao	9.155
Platanal	6.800

Tabla 2. Arroyos significativos de la ciudad de Barranquilla.

FUENTE: (Montero & Sánchez, 2015)

De estos afluentes se proyecta la intervención de los siguientes:

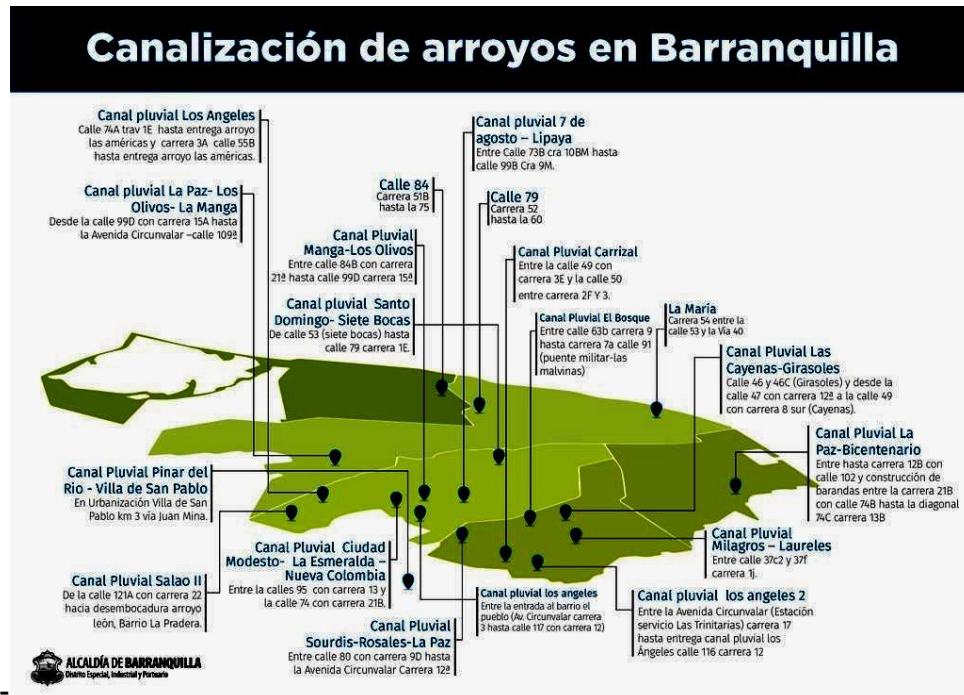


Ilustración 5. Proyectos de canalización de arroyos en Barranquilla.

FUENTE: (Foro Hídrico, 2016)

6.6 MARCO GEOGRÁFICO



Ilustración 6. Ubicación municipio de Barranquilla.

FUENTE: Google Maps.

La ciudad de Barranquilla cuenta con una extensión total de 154 kilómetros cuadrados; está localizada en el vértice nororiental del departamento del Atlántico, sobre la orilla occidental del río Magdalena, a 7,5 km de su desembocadura en el mar Caribe. Barranquilla se encuentra a una latitud $10^{\circ} 59' 16''$ al norte de la línea ecuatorial y una longitud de $74^{\circ} 47' 20''$ al occidente de Greenwich, tomando como referencia la plaza de la Paz, punto cero de la ciudad. El área urbana está

edificada sobre un plano ligeramente inclinado cuyas alturas extremas, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, son 4 msnm al oriente y 98 metros al occidente, sobre el nivel del mar. Otras fuentes señalan alturas accidentales en las lomas, hasta de 120 metros fuera de la ciudad. (Alcaldía de Barranquilla. Distrito Especial, Industrial y Portuario, 2010).

Límites. Políticamente, Barranquilla limita al oriente con el departamento del Magdalena (de por medio el río Magdalena), al norte con el municipio de Puerto Colombia y con el Mar Caribe (predios de la ciénaga de Mallorquín, tajamar occidental y Puerto Mocho), al occidente con los municipios de Puerto Colombia, Galapa y Tubará y al sur con el municipio de Soledad.

6.7 MARCO LEGAL

Según lo establecido por la Ley 99 de 1993 y el Decreto-Ley 216 de 2003, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT, como coordinador del Sistema Nacional Ambiental, es el organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de definir y formular, garantizando la participación de la comunidad, las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, entre ellos el agua.

- DECRETO 1640 DE 2012: Donde se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.
- LEY 373 DE 1997, modificada por LEY 812 de 2003: Donde se aprueba el Plan Nacional de Desarrollo 2003-2006, hacia un estado comunitario.

- RESOLUCIÓN No. 1907 DE 2013: Donde se expide la Guía Técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- RESOLUCIÓN No. 0509 DE 2013: Donde se definen los lineamientos para la conformación de los Consejos de Cuenca y su participación en las fases del Plan de Ordenación de la Cuenca y se dictan otras disposiciones.

Otra de las políticas para el control de estos recursos es la política nacional para la gestión integral del recurso hídrico del año 2010, donde se establecen los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años. Esta política surge como la culminación de una serie de iniciativas de parte del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT, por establecer directrices unificadas para el manejo agua en el país, que además de apuntar a resolver la actual problemática del recurso hídrico, permitan hacer uso eficiente del recurso y preservarlo como una riqueza natural para el bienestar de las generaciones futuras de colombianos.

En la actualidad, el país cuenta con 33 autoridades ambientales regionales distribuidas en todas las áreas del territorio, representadas en las denominadas corporaciones autónomas regionales y corporaciones para el desarrollo sostenible. Dichas entidades fueron creadas o reorganizadas a través de la Ley 99 de 1993, dotadas de autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personería jurídica y están encargadas de la administración del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, incluida el agua, de conformidad con las políticas y disposiciones legales que establezca el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

La Ley 161 de 1994, en virtud del mandato constitucional, creó además la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena – CORMAGDALENA, con el fin de promover la recuperación, el aprovechamiento

sostenible y la preservación del medio ambiente, los recursos ictiológicos y demás recursos naturales renovables del que constituye el río más importante en la zona andina colombiana. CORMAGDALENA coordina el ordenamiento hidrológico y manejo integral del río y las actividades en relación con los aspectos que inciden en el comportamiento de la corriente, en especial, la reforestación, la contaminación de las aguas y las restricciones artificiales de caudales.

El artículo 317 del Código Nacional de los Recursos Naturales (Decreto Ley 2811 de 1974), establece que para la estructuración de un plan de ordenación y manejo de una cuenca se deberá consultar a los usuarios de los recursos de la cuenca y a las entidades públicas y privadas que desarrollan actividades en la región. (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).

7. DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo de este proyecto se ha definido por etapas para establecer mayor claridad en los objetivos que se quieren alcanzar.

FASE 1: RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN. Inicialmente se realizó un diagnóstico hidrológico de la cuenca, por lo que fue necesario el procesamiento de la información que se encuentra registrada en una base de datos generada a partir de 3 pluviómetros instalados por la Universidad de la Costa. La información de lluvias se analizó en los tres puntos para establecer si su comportamiento era uniforme y analizar los resultados obtenidos al ejecutar el modelo para estos eventos.

Posteriormente se tomaron las medidas correspondientes a las secciones transversales a lo largo del cauce, estas mediciones se hicieron con la mayor exactitud posible debido a que los resultados de caudal con los que se pretendía calibrar el modelo hidrológico en SWMM dependían directamente de estos datos.

A partir de esta información se comenzó el análisis de la misma, eliminando aquellos datos que no son útiles, cuyas lecturas no eran coherentes, ya que daban valores excesivamente grandes o existían menos de 4 medidas consecutivas con diferencia de un periodo similar para una misma lluvia, con lo que se obtendrán los hietogramas de los diferentes eventos.

Finalmente, con este análisis preliminar se logró identificar que la calibración solamente se realizaría con la segunda sección, debido a que la primera y la tercera no permitían evaluar y comparar el comportamiento del flujo por la fórmula de Manning, al ser muy irregulares.

FASE 2: DESARROLLO DEL MODELO HIDRÁULICO-HIDROLÓGICO EN EPA SWMM. Para comenzar a desarrollar esta fase fue importante establecer la subcuenca con sus respectivas características. En el nodo de ubicación elegido para la calibración fue fundamental determinar el componente hidráulico, refiriéndonos a esto con aspectos como área mojada, perímetro mojado y radio hidráulico con lo que fue posible establecer los caudales que generaron los eventos seleccionados, lo que se hizo posible gracias a la medición de la sección transversal realizada en la primera fase.

FASE 3: CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO HIDRÁULICO-HIDROLÓGICO. Al obtener dichos caudales y con la información anterior se procedió a la calibración del modelo creado en SWMM, a través del análisis de sensibilidad que consistió en variar parámetros hidrológicos como lo son los términos inerciales, evapotranspiración, infiltración y duración de la tormenta en la simulación, para establecer con que valores se obtenían los mejores resultados. Posteriormente, se graficaron los caudales hallados con Manning versus los obtenidos a través del modelo y se generó una línea de tendencia cuya ecuación permitió el ajuste de los resultados.

8. DESARROLLO DEL TRABAJO

El contenido de este ítem comprende los procesos de cálculos, análisis de sensibilidad y calibración del modelo en estudio, que son el desarrollo esencial de la investigación. Se presenta un análisis detallado de cada paso que se llevó a cabo para llegar a los resultados obtenidos, desde la recolección de información hasta la consecución de los objetivos planteados.

8.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Inicialmente se realizó un diagnóstico hidrológico de la cuenca, por lo que fue necesario el procesamiento de la información que se encuentra registrada en una base de datos generada a partir de pluviómetros y niveles instalados por la Universidad de la Costa.

El mecanismo de registro consistió en un sistema con 3 pluviómetros ubicados a lo largo del cauce principal de la cuenca del arroyo de la carrera 65, dichos dispositivos se accionaban justo en el momento que se presentaba el evento (lluvia); estas mediciones solo eran guardadas y actualizadas si el sistema contaba con datos móviles.

Esta información se pudo recolectar mediante el software llamado RfreeNet Web Manager, el acceso a este software fue facilitado por la Ingeniera Melissa Acosta quien desarrolla un proyecto de investigación para alertas tempranas en base a estos registros. El usuario y la contraseña también fueron suministrados por ella.

- **BARRAS DEL SOFTWARE RFREENET WEB MANAGER.**

COMANDOS PRINCIPALES (BARRA HORIZONTAL): Ofrece distintas opciones de navegación.

COMANDOS SECUNDARIOS (BARRAS VERTICALES): Este tipo de barras van cambiando según el comando principal que se encuentre seleccionado.



Ilustración 7. Barra de comandos principales.
FUENTE: (Clipnode, 2015).

Mapas: Muestra la ubicación de los pluviómetros y niveles que permiten la actualización de información. Su barra vertical está compuesta por el lugar de instalación de pluviómetros (Barranquilla) y los nodos concentradores que son 3.

NODO DE CONCENTRACIÓN	UBICACIÓN	DISPOSITIVOS	NOMBRE DE DISPOSITIVOS
GW_LP_01	Calle 65 con 38B	Pluviómetro Nivel	Pluviome Vega
GW_LP_02	Calle 62 con 47	Pluviómetro Nivel	Pluviometr Vega
GW_LP_03	Calle 59 con 53	Pluviómetro Nivel	Pluviometr Vega

Tabla 3. Información de nodos de concentración.
FUENTE: Propia.

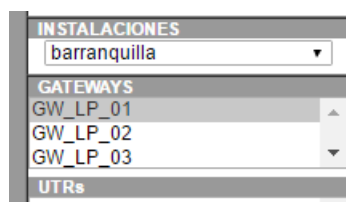






Ilustración 8. Barra vertical de comando principal MAPAS.
FUENTE: (Clipnode, 2015).

Medidas: Ofrece la posibilidad de visualizar todas las medidas registradas.

RfreeNet
Web
Manager





MAPAS
MEDIDAS
METEO
INFORMES
EVENTOS
GESTIÓN
SOPORTE

Conectado como: [Administrador](#)
[cerrar sesión](#)

INSTALACIONES
barranquilla

Ver Información de:
☒ Gateways
☒ UTRs
☒ UTCs

Filtrar por:
- Gateway: Todos los Gateways
☐ Sensor Todos
- UTR: Todas las UTRs
☐ Sensor Todos
- UTCs: Todas las UTCs
☐ Sensor Todos
- Evento: Todos los Eventos

☐ Fecha
- Fecha Inicial:
- Fecha Final:

Fecha y Hora	Evento	ID Origen	Medida
2016-07-15 11:06:12	Batería de Gateway	GW_LP_03	5.11 V
2016-07-15 11:04:49	Datos de Gateway S1 (0..10V/4-20mA S1)	GW_LP_03	1.13 m
2016-07-15 11:02:47	Batería de Gateway	GW_LP_03	5.11 V
2016-07-15 11:02:46	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_03	0 mm
2016-07-15 10:52:00	Batería de Gateway	GW_LP_03	5.11 V
2016-07-15 10:51:11	Umbral Maximo de Gateway S1 (0..10V/4-20mA S1)	GW_LP_03	0.1 m
2016-07-15 10:48:56	Batería de Gateway	GW_LP_03	5.11 V
2016-07-15 10:48:37	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_03	4 mm
2016-07-15 10:47:25	Datos de Gateway S1 (0..10V/4-20mA S1)	GW_LP_03	0.49 m
2016-07-15 10:45:26	Batería de Gateway	GW_LP_03	5.11 V
2016-07-15 10:43:59	Datos de Gateway S1 (0..10V/4-20mA S1)	GW_LP_03	1.24 m
2016-07-15 10:43:34	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_03	0 mm
2016-07-15 10:42:02	Batería de Gateway	GW_LP_03	5.11 V
2016-07-15 10:40:34	Datos de Gateway S1 (0..10V/4-20mA S1)	GW_LP_03	1.24 m
2016-07-15 10:38:38	Batería de Gateway	GW_LP_03	5.11 V

Actualizar

1 de 6

Ilustración 9. Visualización de comando principal MEDIDAS.
FUENTE: (Clipnode, 2015).

En la tabla que arroja el programa se observan casillas como:

- **Fecha y hora** del evento registrado.
- **Evento**, según su tipo. Se manejan eventos como: Batería de los pluviómetros, contador de pulsos, altura de lluvia, niveles, entre otros.
- **ID Origen** que es la identificación de dispositivos que provee esa información o ese dato.

- **Medida**, corresponde al valor en números y su respectiva unidad de medida.

Por su parte en la barra vertical de este comando encontramos las siguientes opciones:

The image shows a software interface titled 'INSTALACIONES'. At the top, there is a search bar containing the text 'barranquilla'. Below this, the interface is divided into four sections, each highlighted with a blue box and a corresponding number in a circle to its right:

- 1**: A section titled 'Ver Información de:' containing three checked checkboxes: 'Gateways', 'UTRs', and 'UTCs'.
- 2**: A section titled 'Filtrar por:' containing three filter groups. Each group has a dropdown menu (all set to 'Todos los...') and a 'Sensor' checkbox (all unchecked). The groups are for 'Gateway', 'UTR', and 'UTCs'.
- 3**: A section titled '- Evento' with a dropdown menu set to 'Todos los Eventos'.
- 4**: A section containing a 'Fecha' checkbox (unchecked) and two date input fields labeled '- Fecha Inicial' and '- Fecha Final', each with a calendar icon.

Ilustración 10. Barra vertical de comando principal MEDIDAS.
FUENTE (Clipnode, 2015).

- **Instalaciones** corresponde al igual que en el comando de MAPAS y en todos los comandos a la ubicación de los dispositivos.

1. **Ver información de:** Permite seleccionar sobre que necesitamos observar datos, donde Gateway corresponde como se mencionó anteriormente a los nodos concentradores y UTRs y UTCs al tipo de hora que se maneja. Para el presente proyecto solo es de interés la opción Gateway.
2. **Filtrar por:** Esta opción permite establecer de que característica específica se desea obtener información. Como se estableció que solo se utilizara la opción de Gateway se debe seleccionar de que nodo de concentración se quieren obtener datos y que tipo de dato (Altura de lluvia: información proveniente de los pluviómetros, o distancia desde el dispositivo hasta el espejo de agua que se produce por el evento: nivel).

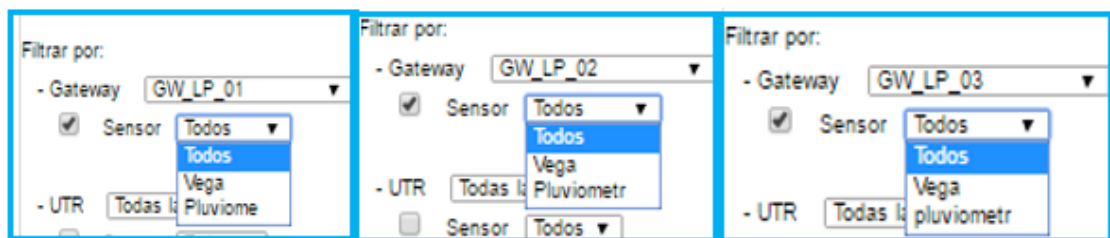


Ilustración 11. Opción filtrar por de barra vertical, comando principal MEDIDAS.

FUENTE: (Clipnode, 2015)

3. **Evento:** Brinda la opción de seleccionar que tipo de información queremos (datos, cobertura de los dispositivos, máximos, mínimos). Para la presente investigación solo se necesita la opción de datos.

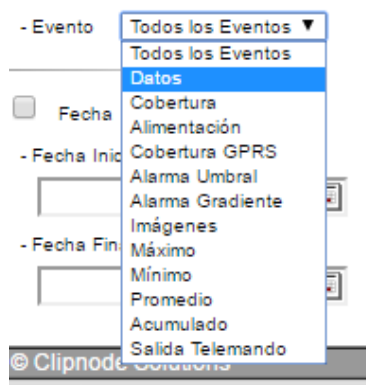


Ilustración 12. Opción evento de barra vertical, comando principal MEDIDAS.
FUENTE: (Clipnode, 2015).

4. **Fecha:** Facilita la búsqueda de datos, permitiendo obtener datos de un día o rango específico.

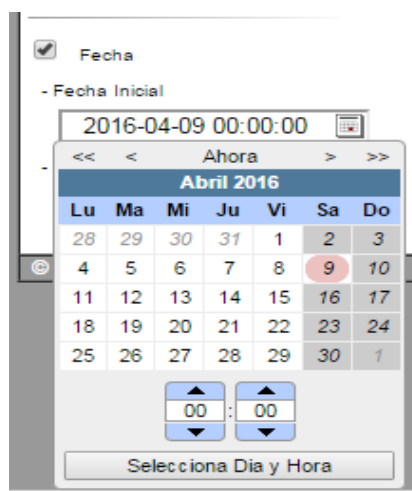


Ilustración 13. Opción fecha de barra vertical, comando principal MEDIDAS.
FUENTE: (Clipnode, 2015).

Meteo: Este comando brinda información meteorológica de los nodos de concentración, no será útil para el desarrollo de esta fase.

Informes: Permite generar graficas de la información registrada.

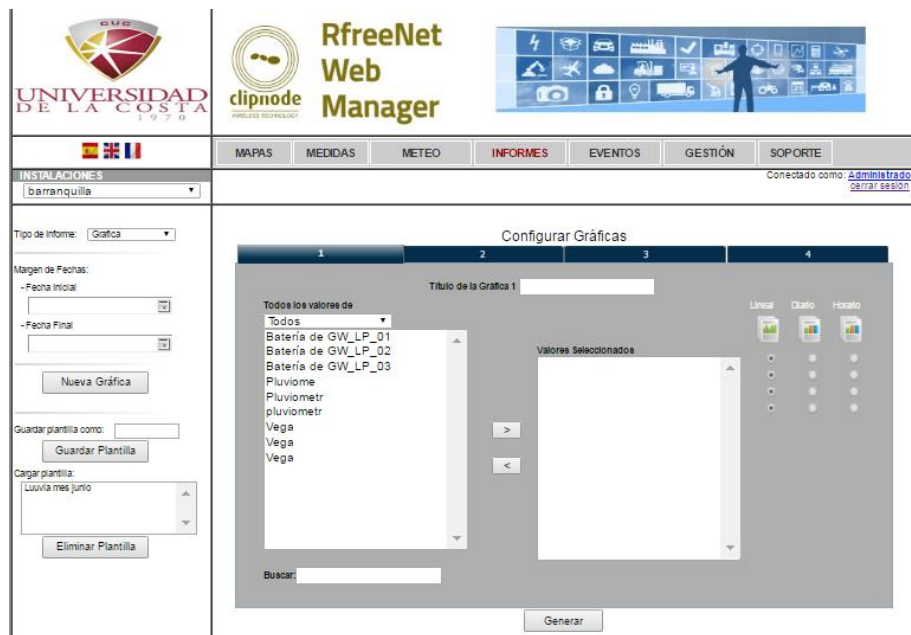


Ilustración 14. Visualización de comando principal INFORMES.
FUENTE: (Clipnode, 2015).

Existe la posibilidad de generar graficas de precipitaciones, niveles y batería de cada nodo. Para esto se debe inicialmente seleccionar el pluviómetro o nivel del que se quiere generar la misma y presionar la flecha a la derecha, adicional a esto se debe hacer uso de la barra vertical que se activa para este comando.

De la barra vertical tenemos varios recuadros, donde:

1. **Tipo de informe:** (Gráfica, gráfica dinámica o CSV).
2. **Margen de fechas:** Permite establecer un rango de tiempo para la gráfica.
3. **Nueva gráfica.**
4. **Guardar o cargar plantilla.**

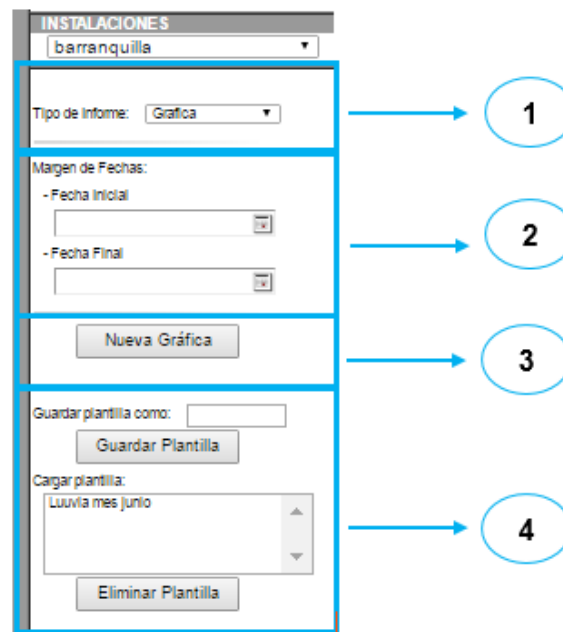


Ilustración 15. Barra vertical de comando principal INFORMES.
FUENTE: (Clipnode, 2015).



Ilustración 16. Paso a paso para generar informe.
FUENTE: (Clipnode, 2015)

Los comandos **Eventos**, **Gestión** y **Soporte** no son de utilidad para la investigación.

A partir del conocimiento de los comandos se comenzaron a generar tablas en el comando medidas mes a mes, para saber qué meses tuvieron eventos y comenzar a seleccionar los días para extraer los datos. Es importante mencionar que los registros con que se cuenta en la investigación pertenecen al año 2015, puesto que solo en un periodo del mismo funcionaron los dispositivos.

A manera de ejemplo se mostrará el paso a paso para extraer los datos para un día específico.

- NODO DE CONCENTRACION: GW_LP_01
- PLUVIOMETRO: Pluviome
- DIA: 26 de Julio-2015

“Medidas > Gateway > GW_LP_01 > Sensor > Pluviome > Eventos > Datos > Fecha > Fecha inicial > Julio 26 de 2015 > 00:00 > Fecha final > Julio 26 de 2015 > 23:59 > Actualizar”

Fecha y Hora	Evento	ID Origen	Medida
2015-07-26 11:43:09	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 11:38:03	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 11:33:00	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 11:27:55	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 11:22:51	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0.2 mm
2015-07-26 11:17:47	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 11:12:43	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 11:07:37	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 11:02:33	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 10:57:30	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 10:52:25	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 10:47:20	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 10:42:16	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 10:37:12	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm
2015-07-26 10:32:07	Datos de Gateway P2 (Contador Pulsos P2)	GW_LP_01	0 mm

Ilustración 17. Resultados de medidas para ejemplo.

FUENTE: Propia.

Luego se exportan estos datos guardando como archivo PDF los resultados y convirtiéndolo en un archivo de Excel lo que facilitaba su procesamiento.

8.2 DESCRIPCIÓN DE MODELO BASE A CALIBRAR

El modelo hidráulico hidrológico a calibrar tiene las siguientes características en SWMM, que son los parámetros iniciales con los que se contó:

- División de tres subcuencas.
- 5 pluviómetros, uno para cada periodo de retorno (para nuestro caso solo se usaron 3, con la información de la tormenta).
- Datos de topografía contratada por la Universidad de la Costa.
- Secciones transversales de la corriente principal cada 50 metros.
- Opción de simulación en onda dinámica, suavizando términos inerciales.
- Opción de transporte en 15 segundos.

8.3 CONSTRUCCIÓN DE HIETOGRAMAS Y SERIES TEMPORALES

Para la calibración del modelo que se plantea para la cuenca del arroyo de la carrera 65 fue necesario introducir los datos reales de lluvias, es decir los registrados por los dispositivos y extraídos desde RfreeNET Web Manager.

Previa a esta construcción fue necesario elegir los días con los que se realizaría la calibración, tomando solo aquellos que tenían más de 4 mediciones consecutivas en periodos de tiempos similares y que no presentaban datos excesivamente grandes que podían ser tomados como erróneos; posteriormente se realizaron los hietogramas.

Tomaremos como ejemplo un día para mostrar todo el proceso.

FECHA: NOVIEMBRE 04 DE 2015

PLUV 1_4 de Noviembre	
<i>PRECIPITACIONES</i>	
Fecha y Hora	medida (mm)
04/11/2015 14:53	2.4
04/11/2015 14:43	1.6
04/11/2015 14:38	1.6
04/11/2015 14:33	1.4
04/11/2015 14:27	1.2
04/11/2015 14:22	0.8
04/11/2015 14:17	0.6
04/11/2015 14:12	0.6
04/11/2015 14:07	0.4
04/11/2015 14:02	0.4
04/11/2015 13:57	0.4
04/11/2015 13:47	0.2

Tabla 4. Datos de precipitaciones 04 Nov 2015 en pluviómetro 1.
FUENTE Propia.

Hietograma- Nov 4	
00:05	0.4
00:15	0.4
00:20	0.6
00:25	1.2
00:30	1.6
00:35	2.4
00:40	1.6
00:45	1.4
00:50	0.8
00:55	0.6
01:00	0.4
01:10	0.2

Tabla 5. Datos para Hietograma.
FUENTE: Propia.

- **Series temporales.** Como la intención principal del proyecto consistía en calibrar el modelo, se trabajó sobre el mismo; dejando solamente 3 pluviómetros uno para aplicar a cada subcuenca la lluvia correspondiente. Cabe aclarar que se generó un modelo para cada tormenta.

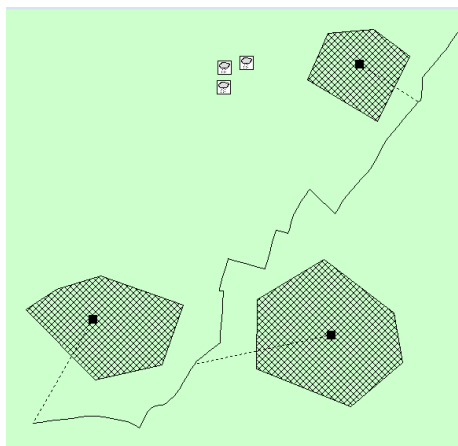


Ilustración 18. Modelo con tres pluviómetros.
FUENTE: Propia.

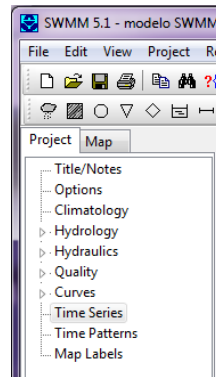


Ilustración 19. Opción para introducir series temporales.
FUENTE: Propia.

The Time Series Editor dialog box is shown. It contains fields for 'Time Series Name' (Hietograma_04_Nov_Pluv1) and 'Description'. There are checkboxes for 'Use external data file named below' and 'Enter time series data in the table below'. The table below contains the following data:

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
11/04/2015	0:05	0.4
11/04/2015	0:15	0.4
11/04/2015	0:20	0.6
11/04/2015	0:25	1.2
11/04/2015	0:30	1.6
11/04/2015	0:35	2.4
11/04/2015	0:40	1.6
11/04/2015	0:45	1.4
11/04/2015	0:50	0.8
11/04/2015	0:55	0.6
11/04/2015	1:00	0.4

Buttons for 'View', 'OK', 'Cancel', and 'Help' are also present.

Ilustración 20. Datos de hietograma en SWMM.
FUENTE: Propia.

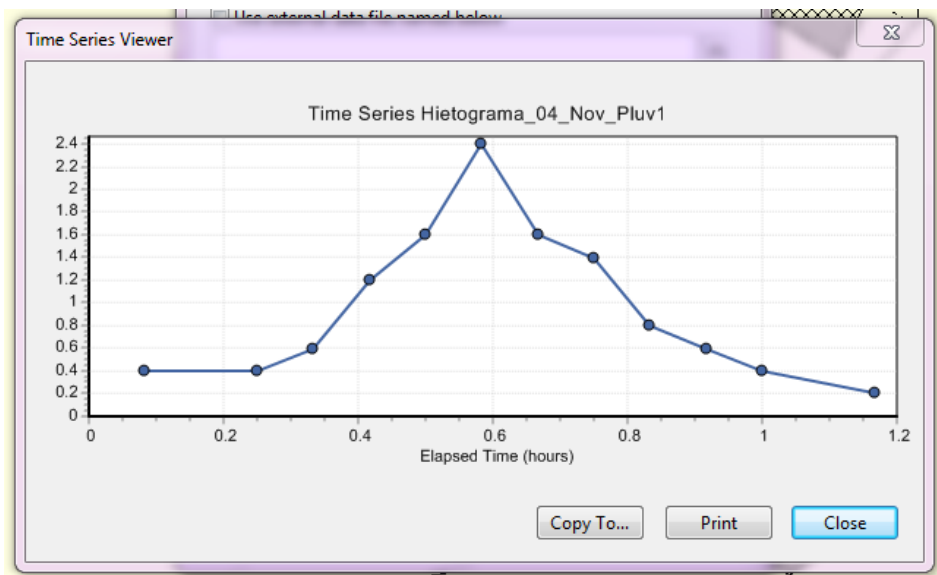


Ilustración 21. Hietograma en SWMM.
FUENTE: Propia.

- **Asignación de serie temporal a pluviómetro.** Con el análisis preliminar se observó que no existía mucha variación entre los resultados generados por el programa al tener tormentas diferentes y al asumir una lluvia uniforme en todas las subcuencas, por lo que se decidió ejecutar el modelo solo con la información de un pluviómetro que presentara mejor grupo de datos.

Property	Value
Name	Pluviometro1
X-Coordinate	921079.380
Y-Coordinate	1708453.661
Description	
Tag	
Rain Format	VOLUME
Time Interval	0:05
Snow Catch Factor	1.0
Data Source	TIMESERIES
TIME SERIES:	
- Series Name	Hietograma_04_Nov_Pluv1
DATA FILE:	
- File Name	*
- Station ID	*
- Rain Units	IN
User-assigned name of rain gage	

Ilustración 22. Cuadro de información en SWMM de pluviómetro 1.
FUENTE: Propia.

8.4 GEOREFERENCIACIÓN NODOS DE CONCENTRACIÓN

Para establecer la ubicación de cada nodo de concentración en el modelo planteado en SWMM, se realizó la georeferenciación del trazado del arroyo sobre un mapa urbano de la ciudad de Barranquilla tomado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Donde se determinaron las coordenadas de cada punto y posteriormente se relacionaron con las más cercanas registradas en el software para la evaluación de los caudales mediante SWMM, se determinó que el punto más acertado era la línea 34, donde la corriente principal se conecta con la subcuenca de la segunda sección, que fue la seleccionada como objeto de estudio.



Ilustración 23. Georeferenciación arroyo.
FUENTE: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2010).

8.5 DEFINICIÓN DE EVENTOS.

Los eventos fueron elegidos de acuerdo a criterios establecidos anteriormente, como la cantidad y uniformidad de sus datos. Se trabajaron entonces con 8 eventos.

Pluviómetro 1:

- 17 de Septiembre
- 18 de Septiembre
- 23 de Septiembre

- 30 de Septiembre
- 25 de Octubre
- 4 de Noviembre.

Pluviómetro 2:

- 23 de Julio
- 11 de Septiembre.

8.6 DETERMINACIÓN CAUDALES TEÓRICOS

Para el cálculo de los caudales teóricos se utilizó la ecuación de Manning, donde cada uno de sus parámetros se determinó de la siguiente forma:

- **n, rugosidad del material:** Se tomó un valor medio dentro del rango de la rugosidad del concreto: 0,015.

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
B. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
1. Sin pintar	0.011	0.012	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030
B-2. No metal			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4. Láminas con listones	0.012	0.015	0.018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra suelta o riprap	0.020	0.030	0.035
e. Fondo de gravas con lados de			
1. Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o riprap	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030	0.500

Tabla 6. Valores del coeficiente de rugosidad n.

Fuente: (Chow, 1994)

- **S, pendiente:** A partir de los datos de elevaciones suministrados en el levantamiento topográfico, se determinó la pendiente en los puntos estudiados a partir de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{(Cota\ superior - Cota\ inferior)}{Distancia}$$

Ecuación 10. Pendiente.

- **Rh, radio hidráulico:** Para el cálculo de este valor, fue necesario determinar el área mojada y el perímetro mojado de la sección ante cada nivel de la lámina de agua registrado. Debido a esto, se utilizó una herramienta del software AUTOCAD, en el que ya se encontraban ingresadas las secciones a lo largo de todo el cauce del arroyo.

NIVELES (m)	AREA (m2)	PERIMETRO (m)	RADIO HIDRAULICO (m)
0,02	0,19	8,035	0,0235
0,05	0,43	8,096	0,0536
0,06	0,51	8,117	0,0633
0,07	0,59	8,138	0,0730
0,08	0,68	8,159	0,0836
0,09	0,75	8,179	0,0916
0,1	0,84	8,2	0,1018
0,11	0,91	8,22	0,1105
0,12	0,996	8,241	0,1209
0,13	1,076	8,261	0,1303
0,14	1,17	8,282	0,1411
0,15	1,23	8,301	0,1482
0,16	1,31	8,323	0,1574
0,17	1,41	8,3	0,1704
0,18	1,47	8,284	0,1777
0,19	1,55	8,377	0,1850
0,2	1,64	8,405	0,1955
0,21	1,74	8,423	0,2062
0,22	1,80	8,445	0,2126
0,23	1,82	8,48	0,2150
0,24	1,96	8,49	0,2305
0,25	2,04	8,512	0,2394
0,26	2,17	8,546	0,2539
0,27	2,20	8,556	0,2571
0,28	2,29	8,992	0,2546
0,29	2,37	9,216	0,2576

NIVELES (m)	AREA (m2)	PERIMETRO (m)	RADIO HIDRAULICO (m)
0,31	2,56	9,59	0,2666
0,32	2,69	9,787	0,2748
0,33	2,74	9,964	0,2753
0,34	2,84	10,152	0,2795
0,35	2,84	10,317	0,2750
0,36	2,91	10,488	0,2777
0,38	3,24	10,905	0,2968
0,39	3,29	10,006	0,3288
0,41	3,55	11,47	0,3097
0,42	3,66	11,648	0,3143
0,43	3,78	11,854	0,3190
0,44	3,89	12,237	0,3182
0,45	3,98	12,57	0,3168
0,46	4,13	13,085	0,3157
0,47	4,27	13,489	0,3163
0,49	4,55	14,905	0,3053
0,5	4,67	16,627	0,2808
0,52	5,04	18,019	0,2796
0,55	5,51	17,614	0,3128
0,56	5,68	17,65	0,3217
0,57	5,84	17,665	0,3308
0,59	6,22	17,717	0,3511
0,62	6,71	17,778	0,3772
0,64	7,07	17,817	0,3966
0,66	7,38	17,857	0,4133
0,69	7,89	17,916	0,4401

Tabla 7. Radio hidráulico para diferentes niveles.

FUENTE: Propia.

8.7 RANGO DE VALORES DE NIVELES EN ESTUDIO

Al realizar la simulación del modelo y obtener los respectivos resultados, se encontraron valores bastante bajos de niveles por lo que se decidió analizar solamente, aquellos que representaran un riesgo para el tráfico peatonal. Para esto se aplicó el **CRITERIO DE LA ESTABILIDAD AL DESLIZAMIENTO** (Nania Escobar, 1999), basándonos en las mismas consideraciones que utilizó el autor, a excepción del peso promedio de una persona; en el que se decidió recrear el escenario más crítico que es garantizar la estabilidad de una niña de 5 años con un peso normal de 17.6 Kg.

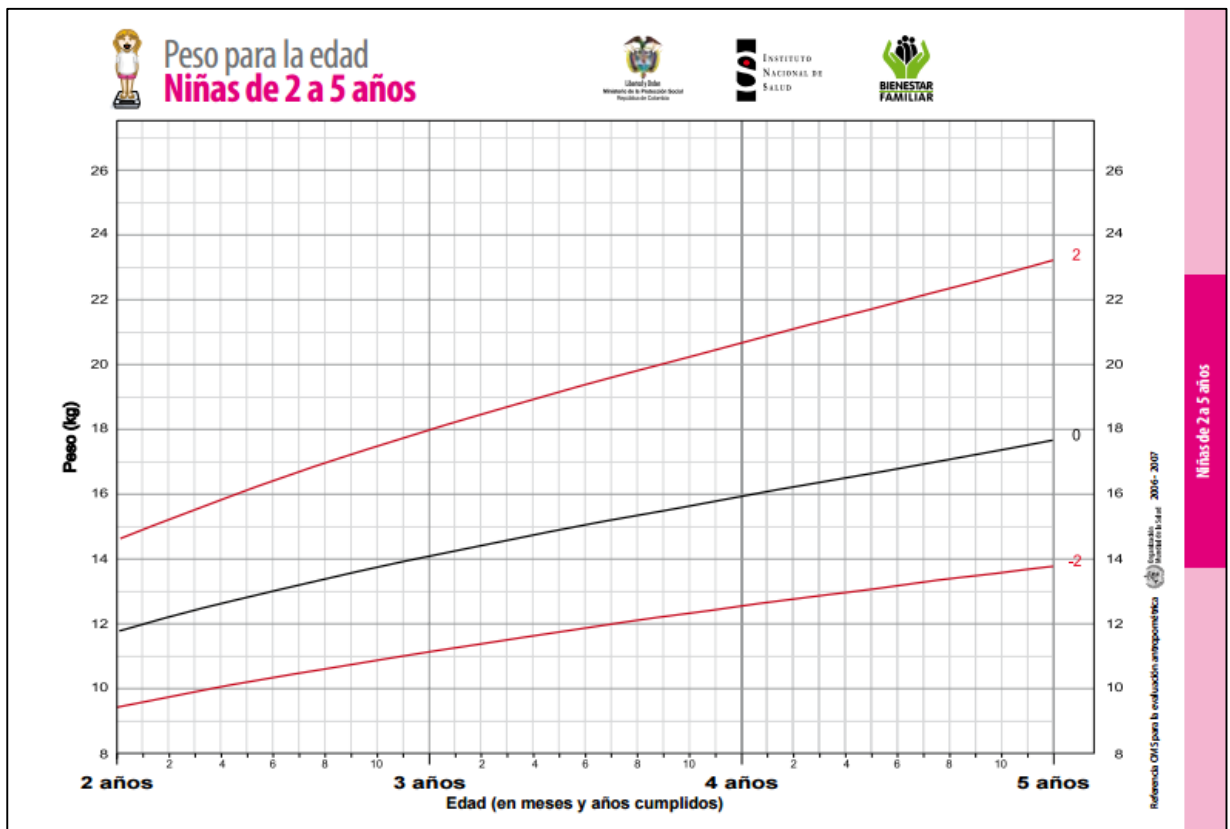


Ilustración 24. Gráfica de patrón de crecimiento en niñas.
FUENTE: (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015).

La condición de estabilidad para este caso, es calculada de la siguiente forma:

$$v^2 y \leq \frac{2\mu P}{C_d \rho B^2} = \frac{2 \cdot 0.5 \cdot 18.6 \cdot 9.81}{1.2 \cdot 1000 \cdot 0.2 \cdot 2} \frac{m^3}{s^2} = 0.38 \frac{m^3}{s^2}$$

Ecuación 11. Determinación condición de estabilidad para esta investigación.

Fuente: Propia.

A partir de esto, se halló la relación entre cada resultado de nivel y velocidad, encontrándose que los valores menores a 0.14 m no representan un riesgo para la seguridad de los peatones, por lo que no se tuvieron en cuenta en esta investigación.

NIVELES, y (m)	VELOCIDAD, v (m/s) Manning	y (v ²)	NIVELES, y (m)	VELOCIDAD, v (m/s) Manning	y (v ²)
0,02	0,4771	0,01	0,31	2,4076	1,8
0,05	0,8263	0,04	0,32	2,4563	1,94
0,06	0,9233	0,06	0,33	2,4595	2
0,07	1,0151	0,08	0,34	2,4842	2,1
0,08	1,1111	0,1	0,35	2,4576	2,12
0,09	1,1808	0,13	0,36	2,4735	2,21
0,1	1,2674	0,17	0,38	2,5862	2,55
0,11	1,3380	0,2	0,39	2,7687	2,99
0,12	1,4207	0,25	0,41	2,6602	2,91
0,13	1,4934	0,29	0,42	2,6867	3,04
0,14	1,5756	0,35	0,43	2,7136	3,17
0,15	1,6274	0,4	0,44	2,7089	3,23
0,16	1,6942	0,46	0,45	2,7008	3,29
0,17	1,7861	0,55	0,46	2,6947	3,35
0,18	1,8369	0,61	0,47	2,6982	3,43
0,19	1,8872	0,68	0,49	2,6349	3,41
0,2	1,9576	0,77	0,5	2,4922	3,11
0,21	2,0286	0,87	0,52	2,4854	3,22
0,22	2,0699	0,95	0,55	2,6779	3,95
0,23	2,0857	1,01	0,56	2,7287	4,17
0,24	2,1849	1,15	0,57	2,7800	4,41
0,25	2,2409	1,26	0,59	2,8926	4,94
0,26	2,3305	1,42	0,62	3,0338	5,71
0,27	2,3501	1,5	0,64	3,1375	6,31
0,28	2,3344	1,53	0,66	3,2246	6,87
0,29	2,3529	1,61	0,69	3,3627	7,81

Tabla 8. Relación yv²- Condición de estabilidad.

Fuente: Propia.

Teniendo definido el rango mínimo de niveles en estudio, se estableció de igual forma un valor máximo de 0.59 metros porque a partir de este valor, la lámina de agua sobrepasa la información geométrica de la sección en estudio, tomada del levantamiento topográfico, por lo que es imposible determinar el caudal teórico (Manning) para niveles mayores al mencionado y posteriormente compararlos con el resultado del software Swmm.

8.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Según (Universidad de Murcia, 2008), el análisis de sensibilidad mide cuanto pueden llegar a afectar a los resultados de un modelo variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros.

Para optimizar el modelo en estudio primero es necesario entender cómo funciona, que parámetros incluye, de qué manera están establecidos y por qué razones fueron fijados.

El modelo posee parámetros hidrológicos e hidráulicos, estos últimos no fueron modificados debido a que están presentes tanto en este como en el modelo teórico, lo que implicaría una variación simultánea en los parámetros, haciendo inadecuada una comparación entre ambos.

Para el desarrollo de este análisis se plantearon variar en el modelo parámetros hidrológicos como área impermeable, transporte y términos de inercia; posteriormente se procedió a ejecutar el modelo para diversos valores de estos, dejando fijos todos los demás y observando de qué manera cambiaban los resultados. Adicional a estos parámetros se encontró que el software es muy susceptible a los tiempos de simulación e incluso a los tiempos de informe, puesto

que al variarlos los resultados también se modificaban. Finalmente se logró identificar que los parámetros que tenían mayor influencia sobre los resultados son los términos de inercia y el tiempo de simulación para cada tormenta.

Para los resultados de Manning, es decir el valor teórico inicialmente se estaba trabajando con la pendiente que suministraba el modelo, la cual corresponde a la pendiente media de toda la subcuenca y con lo que la formula arrojaba datos muy elevados; por lo que se planteó trabajar con la pendiente exacta del punto en estudio (Ver 8.5. DETERMINACIÓN CAUDALES TEÓRICOS).

8.9 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Al realizar el análisis de sensibilidad e identificar los parámetros con mayor influencia en los resultados obtenidos a partir del modelo, se procedió a determinar el valor de cada uno que permitía la mejor simulación.

Inicialmente el modelo arrojaba errores muy altos en el resultado de la simulación; por lo que la calibración del modelo empezó por allí, en la manera de disminuir los errores que presentaba el programa al trabajar con datos reales; es importante recordar que el modelo inicial se realizó con tormentas diseñadas según datos históricos de estaciones pluviométricas de la ciudad de Barranquilla y el municipio de Soledad.

El modelo en estudio se ejecutó en la opción de onda dinámica.

Este método reproduce los retardos y amortiguamientos que genera el tránsito dentro de la red. Es el método más completo para reproducir los fenómenos; sin embargo, su coste computacional puede ser alto. SWMM da tres opciones dentro de este modelo en dependencia al tratamiento de los términos inerciales de la ecuación. La ecuación puede ser resuelta en su versión completa o reducirla al modelo de onda difusiva. La tercera opción es un término medio de las dos anteriores. (Rodríguez, 2013).

De acuerdo a estas investigaciones y los fundamentos de la ecuación de Saint Venant en la que está basado el comportamiento de onda dinámica la primera modificación realizada al modelo para disminuir los errores mencionados, fue cambiar la opción de “Suavizar” por “Mantener” los términos inerciales, esto, aunque aumentó los tiempos de corridas del modelo, disminuyó los errores de la simulación, brindando mayor confiabilidad en los resultados. Es importante aclarar que ningún error sobrepasó el valor máximo definido como aceptable que fue del 5%, por el contrario todos fueron menores a 1% tanto en el cálculo hidráulico como en la continuidad.

Así mismo, dado que las tormentas registradas en los pluviómetros tenían una duración aproximada de 2 horas, se definió este como el tiempo de simulación para todos los eventos, permitiendo mayor uniformidad en los resultados.

Por último, se realizó una gráfica de todos los caudales hallados con Manning versus los obtenidos con el modelo en los distintos eventos y a través de una línea de tendencia se encontró la expresión que explica el comportamiento entre ambos resultados, lo que permitió ajustar los valores provenientes de SWMM.

9. RESULTADOS OBTENIDOS

Con el modelo previamente calibrado, se procedió a simular todos los eventos y registrar los valores que estos arrojaban en Swmm; posteriormente se calculó el porcentaje de error entre estos y los hallados a partir del modelo teórico de Manning; obteniendo los siguientes resultados:

- **23 de Julio**

NIVEL	Caudal swmm	Caudal manning	% Error
0,17	1,18	2,5255	53,276579
0,35	7,07	6,9723	1,4012593
0,38	8,1	8,3715	3,2431464
0,42	9,3	9,8359	5,4484084
0,45	10,49	10,7546	2,4603426
0,5	12,39	11,8581	4,4855415
0,56	14,94	15,4933	3,5712211

Tabla 9. Cálculo de error SWMM vs Manning 23 de Julio 2015.

FUENTE: Propia.

- **11 de Septiembre**

NIVEL	Caudal swmm	Caudal manning	%Error
0,14	1,42	1,8418	22,901509
0,15	1,64	2,0017	18,069641
0,16	1,76	2,2195	20,702861
0,17	2,05	2,5255	18,827955
0,18	2,22	2,704	17,899408
0,19	2,41	2,9251	17,609654
0,2	2,63	3,2163	18,229021
0,21	2,87	3,5237	18,551523
0,22	3,1	3,7156	16,567984

Tabla 10. Cálculo de error SWMM vs Manning 11 de Sept de 2015.

FUENTE: Propia.

- 17 de Septiembre

Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error
0,14	1,46	1,84	20,652174
0,15	1,05	2	47,5
0,16	1,82	2,22	18,003244
0,17	1,96	2,52	22,222222
0,18	2,3	2,7	14,814815
0,19	2,5	2,92	14,383562
0,2	2,73	3,2163	15,119858
0,21	2,99	3,52	15,056818
0,22	3,54	3,7	4,5822102
0,24	3,62	4,27	15,222482
0,25	4	4,56	12,280702
0,27	4,47	5,1702	13,542996
0,28	4,88	5,3434	8,6723809

Tabla 11. Cálculo de error SWMM vs Manning 17 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.

- 18 de Septiembre

Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error
0,22	3,07	3,72	17,374293
0,27	4,49	5,17	13,152805
0,29	5,01	5,58	10,215054
0,31	5,62	6,15	8,6178862
0,33	6,37	6,74	5,4896142
0,36	7,25	7,2	0,6944444
0,39	8,29	9,1	8,9010989
0,43	9,56	10,26	6,8226121
0,47	11,12	11,51	3,3883579
0,52	13,27	12,52	5,9904153
0,57	15,36	16,24	5,4187192

Tabla 12. Cálculo de error SWMM vs Manning 18 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.

- 23 de Septiembre

Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error
0,18	2,32	2,70	14,200223
0,19	2,53	2,92	13,356164
0,2	2,76	3,21	14,018692
0,21	3,02	3,52	14,204545
0,23	3,31	3,8	12,894737
0,24	3,65	4,27	14,519906
0,25	4,04	4,56	11,403509
0,27	4,49	5,17	13,152805
0,29	5,02	5,58	10,035842
0,31	5,61	6,15	8,7804878
0,33	6,37	6,74	5,4896142
0,36	7,26	7,2	0,8333333
0,39	8,31	9,1	8,6813187
0,43	9,58	10,26	6,6276803
0,47	11,18	11,51	2,8670721
0,49	12,01	12	0,0833333
0,52	13,23	12,51	5,7553957
0,56	14,97	15,49	3,3570045

Tabla 13. Cálculo de error SWMM vs Manning 23 de Sept 2015.
FUENTE Propia.

- 30 de Septiembre

Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error
0,19	2,34	2,92	19,863014
0,29	5,07	5,58	9,1397849
0,31	5,68	6,15	7,6422764
0,34	6,45	7,04	8,3806818
0,36	7,35	7,2	2,0833333
0,39	8,42	9,1	7,4725275
0,41	9,05	9,44	4,1313559
0,43	9,71	10,26	5,3606238
0,47	11,27	11,51	2,0851434
0,52	13,3	12,51	6,314948
0,59	16,24	17,99	9,7276265

Tabla 14. Cálculo de error SWMM vs Manning 30 de Sept 2015.
FUENTE Propia.

- 25 de Octubre

Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error
0,18	2,3	2,7	14,814815
0,35	6,83	6,97	2,0409334
0,38	7,81	8,3715	6,7072807
0,41	8,97	9,45	5,0793651
0,44	9,98	10,54	5,313093
0,45	10,37	10,75	3,5348837
0,49	12,18	11,98	1,6694491
0,55	14,25	14,8	3,3898305

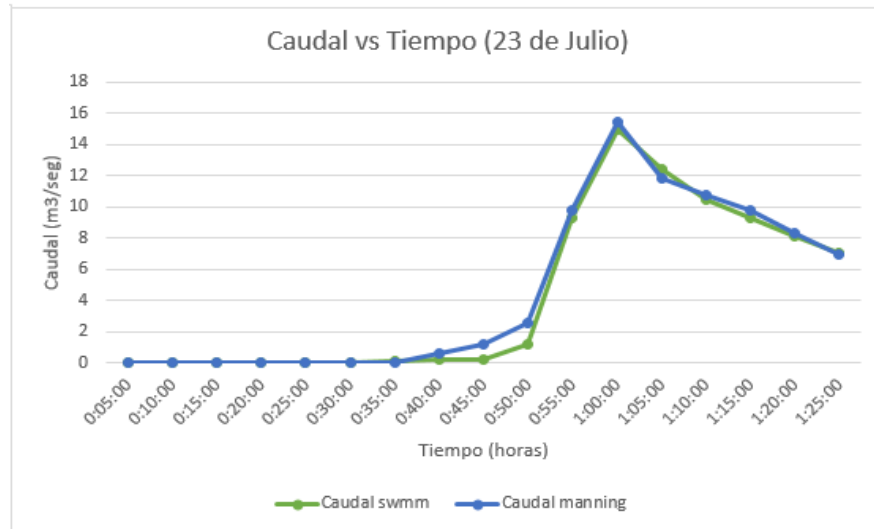
Tabla 15. Cálculo de error SWMM vs Manning 25 de Oct 2015.
FUENTE Propia.

- 04 de Noviembre

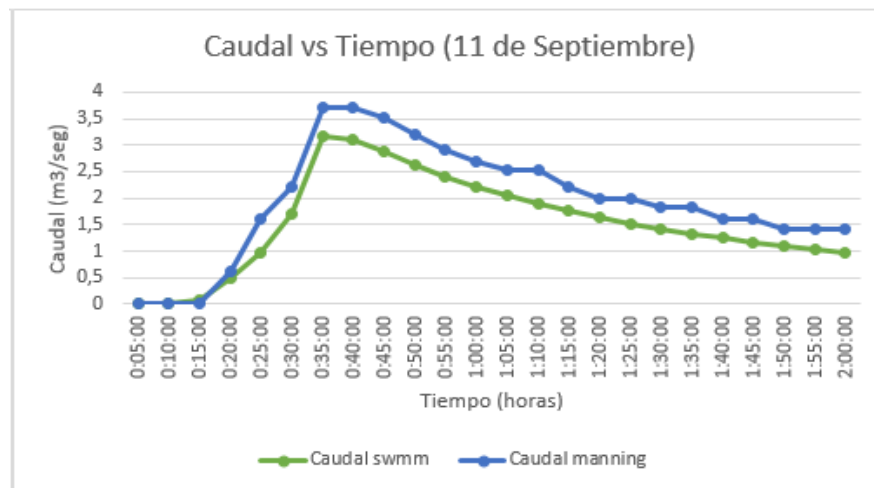
Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error
0,15	1,67	2	16,5
0,16	1,86	2,22	16,216216
0,17	2,1	2,52	16,666667
0,18	2,28	2,70	15,555556
0,19	2,48	2,9	15,068493
0,2	2,7	3,21	15,88785
0,21	2,96	3,52	15,909091
0,22	3,23	3,71	12,938005
0,23	3,5	3,8	7,8947368
0,24	3,76	4,27	11,943794
0,25	4,02	4,56	11,842105

Tabla 16. Cálculo de error SWMM vs Manning 04 de Nov 2015.
FUENTE Propia.

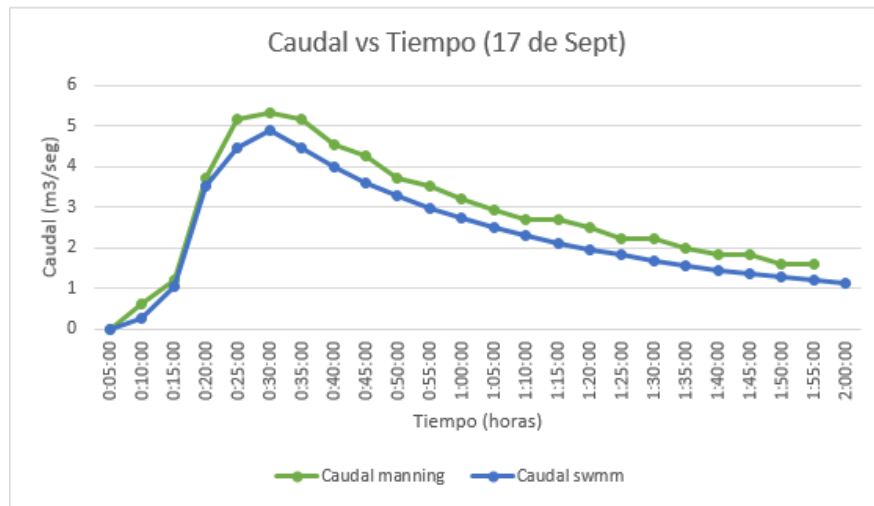
9.1 HIDROGRAMAS OBTENIDOS



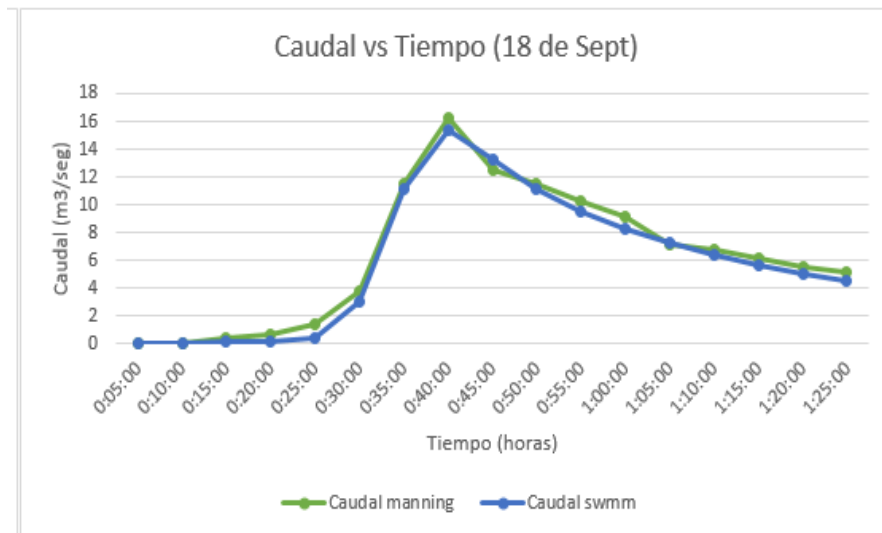
Gráfica 1. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 23 de Julio 2015.
FUENTE: Propia.



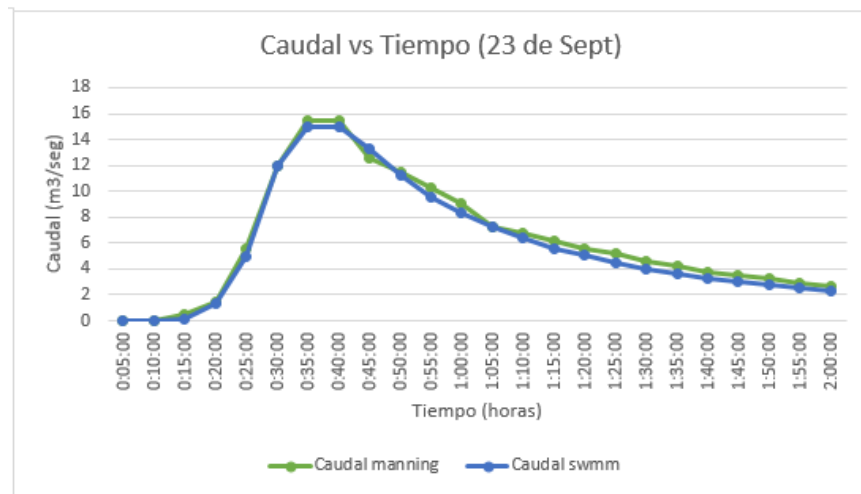
Gráfica 2. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 11 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.



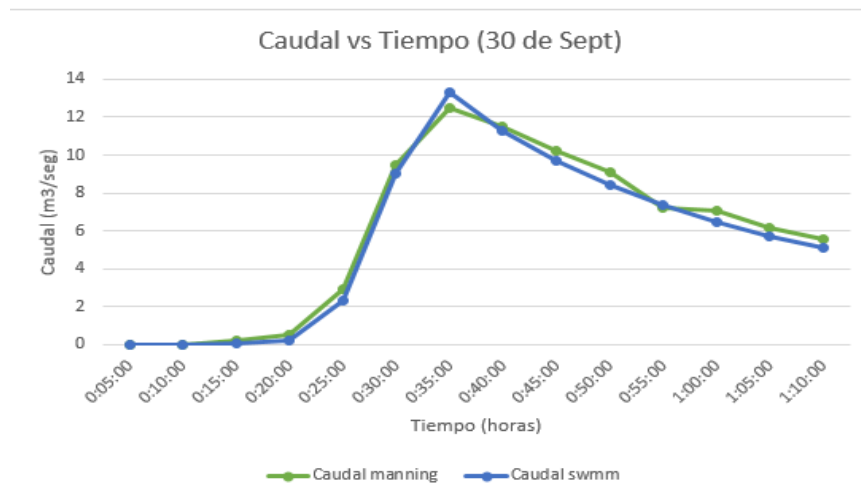
Gráfica 3. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 17 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.



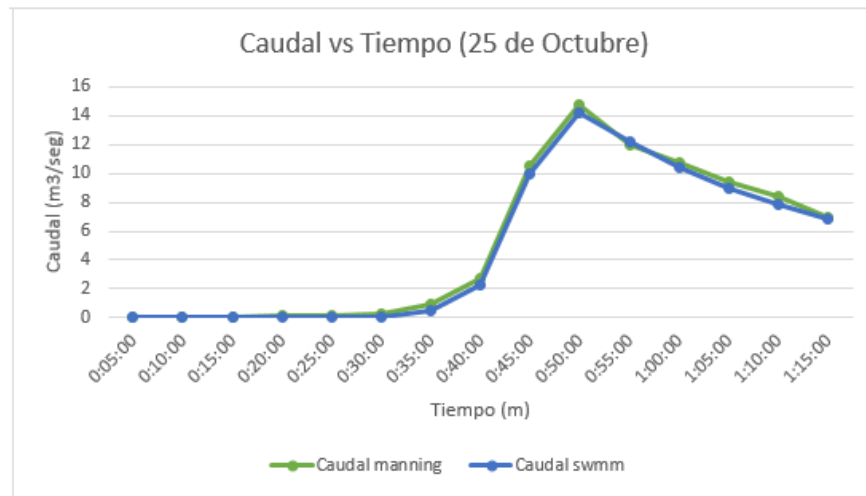
Gráfica 4. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 18 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.



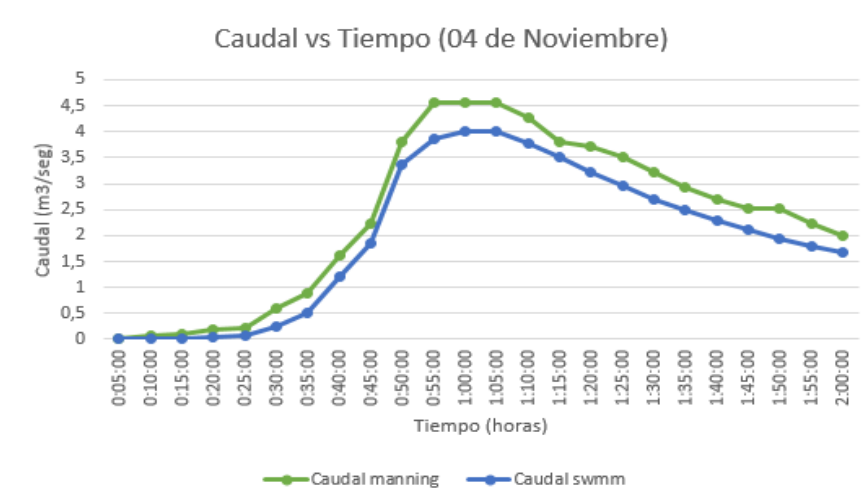
Gráfica 5. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 23 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.



Gráfica 6. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 30 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.



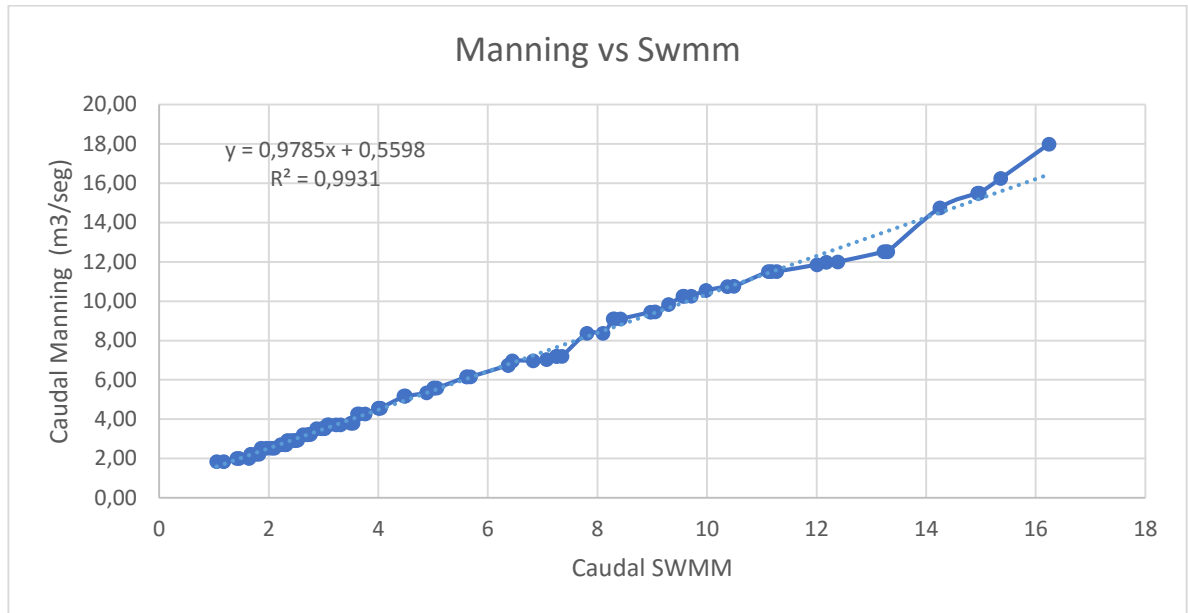
Gráfica 7. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 25 de Oct 2015.
FUENTE: Propia.



Gráfica 8. Hidrograma de caudales obtenidos a través de Swmm y Manning 04 de Nov 2015.
FUENTE: Propia.

9.2 AJUSTE DE CAUDALES OBTENIDOS

A partir de estos resultados iniciales se realizó la gráfica Q Swmm vs Q Manning, así:



Gráfica 9. Q Manning vs Q Swmm.

FUENTE: Propia.

Al agregarle la línea de tendencia, se encontró que el Coeficiente de Correlación dio muy cercano a 1 ($R = 0,9965$), evidenciándose gran relación entre un grupo de valores y el otro, lo que indica una buena confiabilidad de los resultados.

9.3 COMPARACIÓN RESULTADOS INICIALES VS RESULTADOS OBTENIDOS AL REALIZAR AJUSTE

- 23 de Julio:

23 DE JULIO DE 2015				23 DE JULIO DE 2015-CORREGIDO			
NIVEL	Caudal swmm	Caudal manning	% Error	NIVEL	Caudal Swmm C	Caudal manning	% Error
0.17	1.18	2.5255	53.2765789	0.17	1.71	2.5255	32.11522471
0.35	7.07	6.9723	1.401259269	0.35	7.48	6.9723	7.250046613
0.38	8.1	8.3715	3.24314639	0.38	8.49	8.3715	1.363554918
0.42	9.3	9.8359	5.448408382	0.42	9.66	9.8359	1.789871796
0.45	10.49	10.7546	2.460342551	0.45	10.82	10.7546	0.647769327
0.5	12.39	11.8581	4.485541529	0.5	12.68	11.8581	6.959926126
0.56	14.94	15.4933	3.571221108	0.56	15.18	15.4933	2.031265128
			PROMEDIO % ERROR 10.55521402				PROMEDIO % ERROR 7.451094088

Tabla 17. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 23 de Julio 2015.

FUENTE: Propia.

- 11 de Septiembre:

11 DE SEPTIEMBRE DE 2015				11 DE SEPTIEMBRE DE 2015-CORREGIDO			
NIVEL	Caudal swmm	Caudal manning	%Error	NIVEL	Caudal Swmm C	Caudal manning	%Error
0.14	1.42	1.8418	22.90150939	0.14	1.95	1.8418	5.835052666
0.15	1.64	2.0017	18.06964081	0.15	2.16	2.0017	8.135085178
0.16	1.76	2.2195	20.702861	0.16	2.28	2.2195	2.81414733
0.17	2.05	2.5255	18.82795486	0.17	2.57	2.5255	1.59275391
0.18	2.22	2.704	17.89940828	0.18	2.73	2.704	1.038091716
0.19	2.41	2.9251	17.60965437	0.19	2.92	2.9251	0.243239547
0.2	2.63	3.2163	18.22902092	0.2	3.13	3.2163	2.582004166
0.21	2.87	3.5237	18.55152255	0.21	3.37	3.5237	4.41595482
0.22	3.1	3.7156	16.56798364	0.22	3.59	3.7156	3.295564646
			PROMEDIO % ERROR 18.81772843				PROMEDIO % ERROR 3.32798822

Tabla 18. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 11 de Sept 2015.

FUENTE: Propia.

- 17 de Septiembre:

17 DE SEPTIEMBRE DE 2015				17 DE SEPTIEMBRE DE 2015- CORREGIDO			
Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error	Nivel	Caudal Swmm C	Caudal manning	% error
0.14	1.46	1.84	20.65217391	0.14	1.99	1.84	8.06576087
0.15	1.05	2	47.5	0.15	1.59	2	20.63875
0.16	1.82	2.22	18.00324383	0.16	2.34	2.22	5.454586412
0.17	1.96	2.52	22.22222222	0.17	2.48	2.52	1.68015873
0.18	2.3	2.7	14.81481481	0.18	2.81	2.7	4.087037037
0.19	2.5	2.92	14.38356164	0.19	3.01	2.92	2.946917808
0.2	2.73	3.2163	15.11985822	0.2	3.23	3.2163	0.460311538
0.21	2.99	3.52	15.05681818	0.21	3.49	3.52	0.9796875
0.22	3.54	3.7	4.582210243	0.22	4.02	3.7	8.455256065
0.24	3.62	4.27	15.22248244	0.24	4.10	4.27	3.935128806
0.25	4	4.56	12.28070175	0.25	4.47	4.56	1.890350877
0.27	4.47	5.1702	13.5429964	0.27	4.93	5.1702	4.574387838
0.28	4.88	5.3434	8.672380881	0.28	5.33	5.3434	0.15944904
			PROMEDIO % ERROR 17.08103573				PROMEDIO % ERROR 4.871367886

Tabla 19. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 17 de Sept 2015.

FUENTE: Propia.

- 18 de Septiembre:

18 DE SEPTIEMBRE DE 2015				18 DE SEPTIEMBRE DE 2015-CORREGIDO			
Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error	Nivel	Caudal Swmm C	Caudal manning	% error
0.22	3.07	3.72	17.37429347	0.22	3.56	3.72	4.084338828
0.27	4.49	5.17	13.15280464	0.27	4.95	5.17	4.192166344
0.29	5.01	5.58	10.21505376	0.29	5.46	5.58	2.113172043
0.31	5.62	6.15	8.617886179	0.31	6.06	6.15	1.480162602
0.33	6.37	6.74	5.489614243	0.33	6.79	6.74	0.784050445
0.36	7.25	7.2	0.694444444	0.36	7.65	7.2	6.304513889
0.39	8.29	9.1	8.901098901	0.39	8.67	9.1	4.708076923
0.43	9.56	10.26	6.822612086	0.43	9.91	10.26	3.369785575
0.47	11.12	11.51	3.38835795	0.47	11.44	11.51	0.601911381
0.52	13.27	12.52	5.990415335	0.52	13.54	12.52	8.182867412
0.57	15.36	16.24	5.418719212	0.57	15.59	16.24	4.005172414
			PROMEDIO % ERROR 7.824118203				PROMEDIO % ERROR 3.62056526

Tabla 20. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 18 de Sept 2015.

FUENTE: Propia.

- **23 de Septiembre:**

23 DE SEPTIEMBRE DE 2015				23 DE SEPTIEMBRE DE 2015-CORREGIDO			
Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error	Nivel	Caudal Swmm C	Caudal manning	% error
0.18	2.32	2.70	14.20022322	0.18	2.83	2.70	4.657975988
0.19	2.53	2.92	13.35616438	0.19	3.04	2.92	3.952226027
0.2	2.76	3.21	14.01869159	0.2	3.26	3.21	1.571962617
0.21	3.02	3.52	14.20454545	0.21	3.51	3.52	0.145738636
0.23	3.31	3.8	12.89473684	0.23	3.80	3.8	0.035921053
0.24	3.65	4.27	14.51990632	0.24	4.13	4.27	3.24765808
0.25	4.04	4.56	11.40350877	0.25	4.51	4.56	1.032017544
0.27	4.49	5.17	13.15280464	0.27	4.95	5.17	4.192166344
0.29	5.02	5.58	10.03584229	0.29	5.47	5.58	1.93781362
0.31	5.61	6.15	8.780487805	0.31	6.05	6.15	1.639268293
0.33	6.37	6.74	5.489614243	0.33	6.79	6.74	0.784050445
0.36	7.26	7.2	0.833333333	0.36	7.66	7.2	6.440416667
0.39	8.31	9.1	8.681318681	0.39	8.69	9.1	4.493021978
0.43	9.58	10.26	6.627680312	0.43	9.93	10.26	3.179044834
0.47	11.18	11.51	2.867072111	0.47	11.50	11.51	0.091833189
0.49	12.01	12	0.083333333	0.49	12.31	12	2.596541667
0.52	13.23	12.51	5.755395683	0.52	13.51	12.51	7.95647482
0.56	14.97	15.49	3.357004519	0.56	15.21	15.49	1.820884442
PROMEDIO % ERROR			8.903425753	PROMEDIO % ERROR			2.76527868

Tabla 21. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 23 de Sept 2015.

FUENTE: Propia.

- **30 de Septiembre:**

30 DE SEPTIEMBRE DE 2015				30 DE SEPTIEMBRE DE 2015-CORREGIDO			
Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error	Nivel	Caudal Swmm C	Caudal manning	% error
0.19	2.34	2.92	19.8630137	0.19	2.85	2.92	2.414726027
0.29	5.07	5.58	9.139784946	0.29	5.52	5.58	1.061021505
0.31	5.68	6.15	7.642276423	0.31	6.12	6.15	0.525528455
0.34	6.45	7.04	8.380681818	0.34	6.87	7.04	2.398792614
0.36	7.35	7.2	2.083333333	0.36	7.75	7.2	7.663541667
0.39	8.42	9.1	7.472527473	0.39	8.80	9.1	3.31021978
0.41	9.05	9.44	4.131355932	0.41	9.42	9.44	0.262447034
0.43	9.71	10.26	5.360623782	0.43	10.06	10.26	1.939230019
0.47	11.27	11.51	2.085143354	0.47	11.59	11.51	0.673284101
0.52	13.3	12.51	6.314948042	0.52	13.57	12.51	8.503996803
0.59	16.24	17.99	9.727626459	0.59	16.45	17.99	8.556753752
			PROMEDIO % ERROR 7.472846842				PROMEDIO % ERROR 3.391776523

Tabla 22. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 30 de Sept 2015.

FUENTE: Propia.

- **25 de Octubre:**

25 DE OCTUBRE DE 2015				25 DE OCTUBRE DE 2015-CORREGIDO			
Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error	Nivel	Caudal Swmm C	Caudal manning	% error
0.18	2.3	2.7	14.81481481	0.18	2.81	2.7	4.087037037
0.35	6.83	6.97	2.040933408	0.35	7.24	6.97	3.881861079
0.38	7.81	8.3715	6.707280655	0.38	8.20	8.3715	2.02610046
0.41	8.97	9.45	5.079365079	0.41	9.34	9.45	1.196349206
0.44	9.98	10.54	5.313092979	0.44	10.33	10.54	2.037666034
0.45	10.37	10.75	3.534883721	0.45	10.71	10.75	0.40144186
0.49	12.18	11.98	1.669449082	0.49	12.48	11.98	4.156343907
0.55	14.25	14.8	3.389830508	0.55	14.50	14.8	1.671694915
			PROMEDIO % ERROR 5.318706281				PROMEDIO % ERROR 2.432311812

Tabla 23. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 25 de Oct 2015.

FUENTE: Propia.

- **04 de Noviembre:**

04 DE NOVIEMBRE DE 2015				04 DE NOVIEMBRE DE 2015-CORREGIDO			
Nivel	Caudal swmm	Caudal manning	% error	Nivel	Caudal Swmm C	Caudal manning	% error
0.15	1.67	2	16.5	0.15	2.19	2	9.69475
0.16	1.86	2.22	16.21621622	0.16	2.38	2.22	7.198648649
0.17	2.1	2.52	16.66666667	0.17	2.61	2.52	3.755952381
0.18	2.28	2.70	15.55555556	0.18	2.79	2.70	3.362222222
0.19	2.48	2.9	15.06849315	0.19	2.99	2.9	2.276712329
0.2	2.7	3.21	15.88785047	0.2	3.20	3.21	0.257009346
0.21	2.96	3.52	15.90909091	0.21	3.46	3.52	1.813636364
0.22	3.23	3.71	12.93800539	0.22	3.72	3.71	0.279110512
0.23	3.5	3.8	7.894736842	0.23	3.98	3.8	4.856578947
0.24	3.76	4.27	11.94379391	0.24	4.24	4.27	0.726932084
0.25	4.02	4.56	11.84210526	0.25	4.49	4.56	1.461184211
			PROMEDIO % ERROR 14.22022858				PROMEDIO % ERROR 3.243885186

Tabla 24. Comparación resultados iniciales con resultados obtenidos del ajuste 04 de Nov 2015.

FUENTE: Propia.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

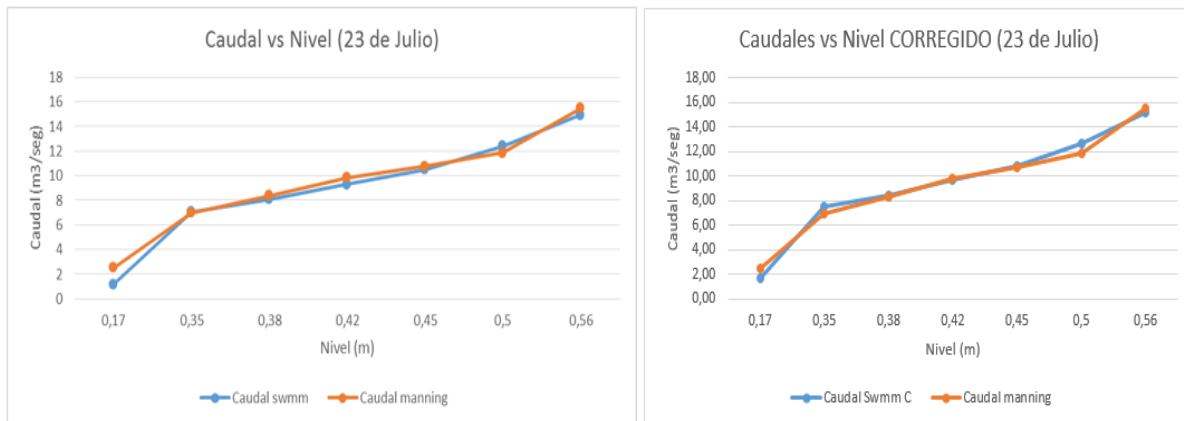
Para el desarrollo de esta investigación se contó con tres estaciones pluviométricas instaladas a lo largo del cauce del arroyo, cuya función era medir las precipitaciones ante un evento de lluvia. Durante el año en el que se realizó el muestreo, las lluvias en la ciudad de Barranquilla fueron escasas en comparación con años anteriores debido al fenómeno del Niño, además la ciudad se caracteriza por experimentar lluvias de una gran intensidad en un corto periodo de tiempo, situación que empeoró por la razón antes mencionada; todo esto dificultó una adecuada toma de datos, por lo que finalmente se decidió eliminar todos aquellos eventos de precipitación cuyos valores no manejaban un intervalo relativamente constante entre uno y otro.

Durante la simulación del modelo para los eventos y como producto de la calibración realizada, se obtuvieron errores propios del software que no sobrepasaban el 1%.

De igual forma, es importante resaltar que los resultados mostrados, no contemplan eventos en los que la lluvia genere un nivel menor que el considerado peligroso para una niña de 5 años con un peso promedio en Colombia, tal como se describe en **“8.6. RANGO DE VALORES DE NIVELES EN ESTUDIO”**. También se definió que niveles mayores a 0.59 m no serían tomados en cuenta, debido a que sobrepasan la sección transversal ingresada en el modelo, lo que no permitía para estos casos una correcta simulación.

A partir de los resultados obtenidos, se realizaron graficas que permiten observar la variación del caudal entre el modelo teórico y el calibrado en cuanto al nivel de la lámina de agua.

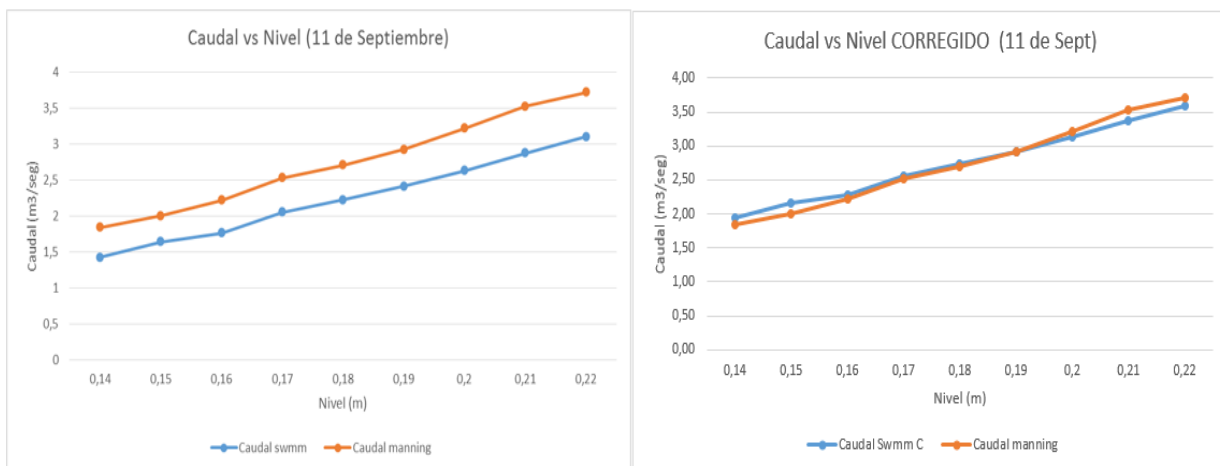
- **23 de Julio**



Gráfica 10. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 23 de Julio 2015.

FUENTE: Propia.

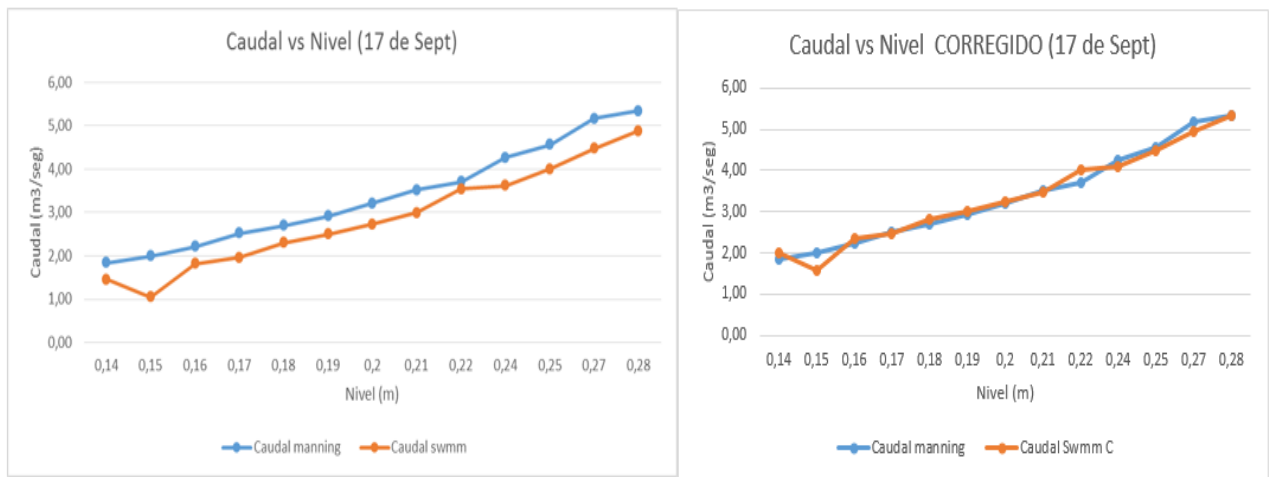
- **11 de Septiembre**



Gráfica 11. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 11 de Sept 2015.

FUENTE: Propia.

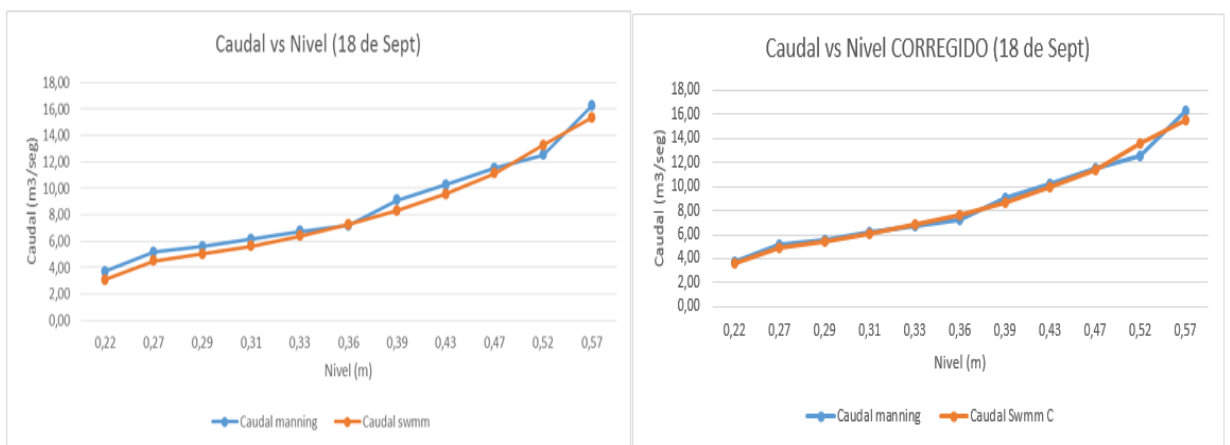
- 17 de Septiembre



Gráfica 12. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 17 de Sept 2015.

FUENTE: Propia.

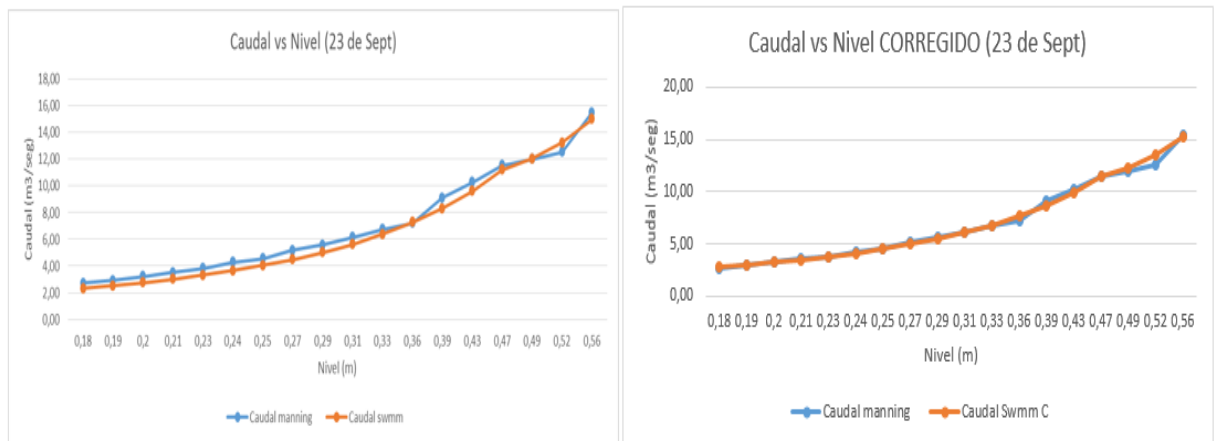
- 18 de Septiembre



Gráfica 13. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 18 de Sept 2015.

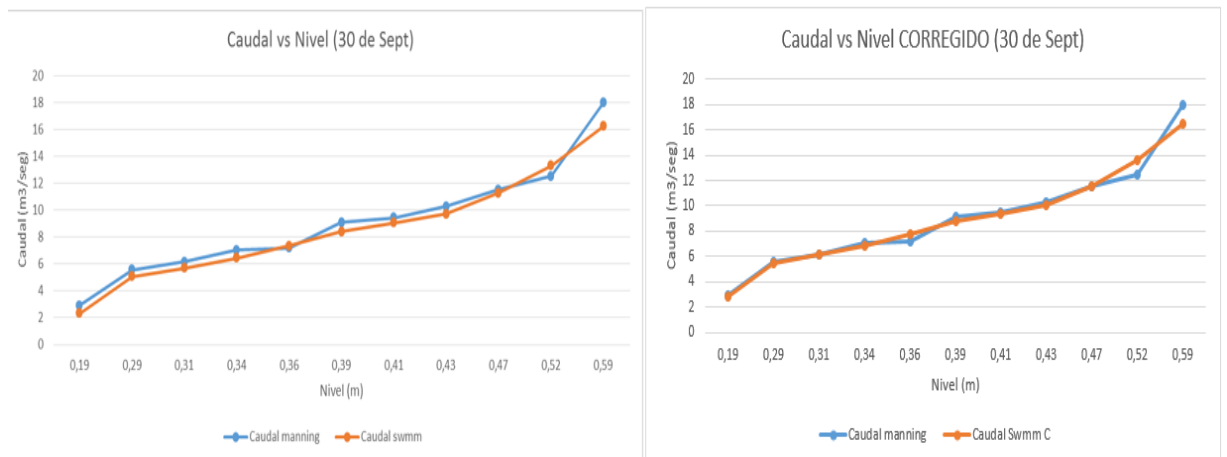
FUENTE: Propia.

- 23 de Septiembre



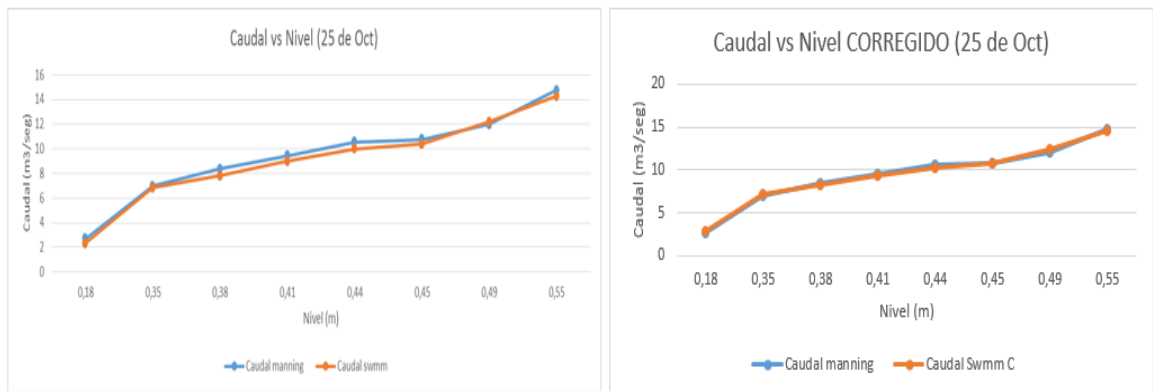
Gráfica 14. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 23 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.

- 30 de Septiembre



Gráfica 15. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 30 de Sept 2015.
FUENTE: Propia.

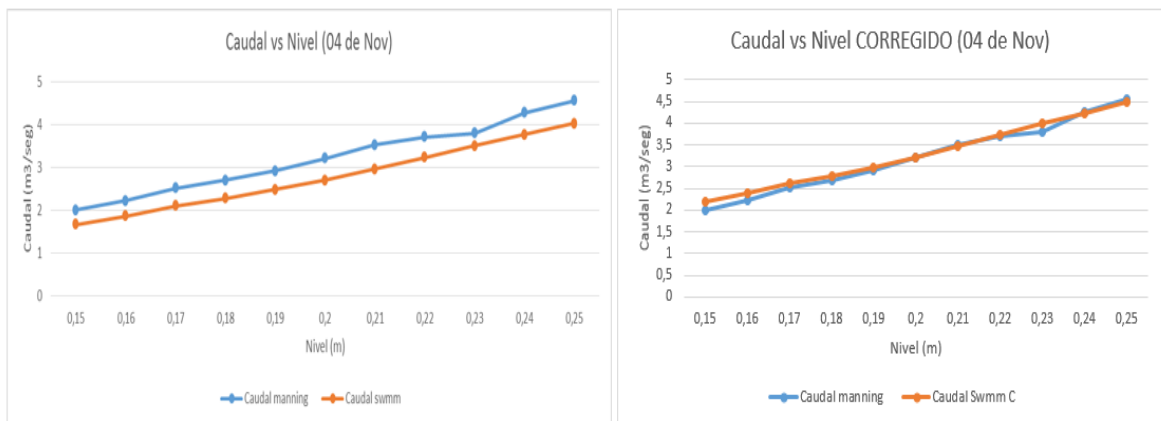
- 25 de Octubre



Gráfica 16. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 25 de Oct 2015.

FUENTE: Propia.

- 04 de Noviembre



Gráfica 17. Comportamientos de resultados obtenidos a través de SWMM y Manning 04 de Nov 2015.

FUENTE: Propia.

Comparando los caudales iniciales de Swmm con los valores teóricos, es decir Manning, se evidencia que los valores del modelo son en su mayoría menores que los obtenidos a partir de Manning, por lo que los porcentajes de errores se deben principalmente a que el software tiene en cuenta parámetros hidrológicos como área impermeable, transporte, términos inerciales, evapotranspiración, entre otros, que Manning no contempla; además, este último supone un flujo uniforme, mientras que SWMM considera posibles pérdidas, acumulación y otros fenómenos propios de la escorrentía superficial que fluye en una estructura que no está diseñada para el transporte de grandes volúmenes de agua.

Por otro lado, al determinar la relación entre los resultados del modelo inicial y el modelo ajustado se encontró que esta es positiva o directa ya que el coeficiente de correlación lineal arrojado para este grupo de datos fue bastante cercano a 1.

En cuanto a los porcentajes de error, se puede hablar de dos tipos, el hallado comparando los caudales obtenidos a través de Swmm y Manning para cada nivel durante un evento de lluvia, y el error promedio para cada evento. Para casos puntuales de errores entre caudales, el mayor valor obtenido fue de 32%, dicho porcentaje solo se presenta para el evento del 23 de Julio en un nivel relativamente bajo de 0.17 metros, si se optara por eliminar este dato bastante disperso se lograría quizás un mejor ajuste; el valor más bajo fue de 0.035% el día 23 de Septiembre. En cuanto al error promedio de cada evento, el valor más alto fue de 7.45% para el día 23 de Julio, el cual considerarse como aceptable debido a que es inferior al 10%; por su parte el menor porcentaje obtenido fue de 2.43% en el evento del 25 de Octubre.

Finalmente, el error promedio disminuyó del 11.27% al 3.88%, lo que indica que el modelo se encuentra calibrado adecuadamente y los resultados obtenidos a través de este, son confiables.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La cuenca del arroyo de la carrera 65, presenta al igual que la ciudad en general, lluvias de gran intensidad en corto períodos de tiempo, por lo que se observó que los caudales aumentan considerablemente en intervalos pequeños.
- El modelo de estudio en esta investigación no se realizó con tormentas de diseño, sino a partir de valores de precipitaciones reales ingresados al software para simular adecuadamente.
- A través de la realización del análisis de sensibilidad, fueron identificados los parámetros de términos inerciales y duración de la simulación, como los más influyentes en el modelo de SWMM.
- Durante la calibración se identificaron los valores óptimos de los parámetros, para los cuales el modelo se comportaba de la mejor forma ante los resultados obtenidos teóricamente con Manning.
- Se determinó que el modelo de onda dinámica en su versión más completa, es el indicado para representar el comportamiento de este tipo de flujo, ya que contempla fenómenos presentes en el transporte de la escorrentía superficial por las vías, realizando una mejor simulación.
- El modelo fue calibrado con base a la sección 2, debido a que los otros dos nodos de concentración no permitían un correcto análisis al no presentar secciones uniformes.
- Se realizó la comparación entre los resultados hallados a través de Manning y los corregidos luego de realizar el ajuste, observándose comportamientos muy similares al obtener un coeficiente de correlación $r=0.9965$ y un error promedio de 3.88%, lo que evidencia que la calibración fue adecuada y que el modelo SWMM simula acertadamente las condiciones reales de la cuenca del arroyo de la carrera 65.

- Para estudios similares se recomienda inicialmente realizar la toma de datos en períodos donde se den la mayor cantidad de lluvias para contar con una muestra más amplia, así mismo, realizar un estudio previo del cauce de la corriente que permita identificar los puntos idóneos de ubicación de las estaciones pluviométricas.

12. RECURSOS

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se harán necesarios los siguientes recursos:

- Storm Water Management Model (EPA SWMM).
- Base de datos registrada en RfreeNet Web Manager.
- Estaciones de registro.
- Paquete de Office 2013.
- AutoCAD.
- Cinta métrica.
- Cámara fotográfica.
- Computadores.

13. CRONOGRAMA

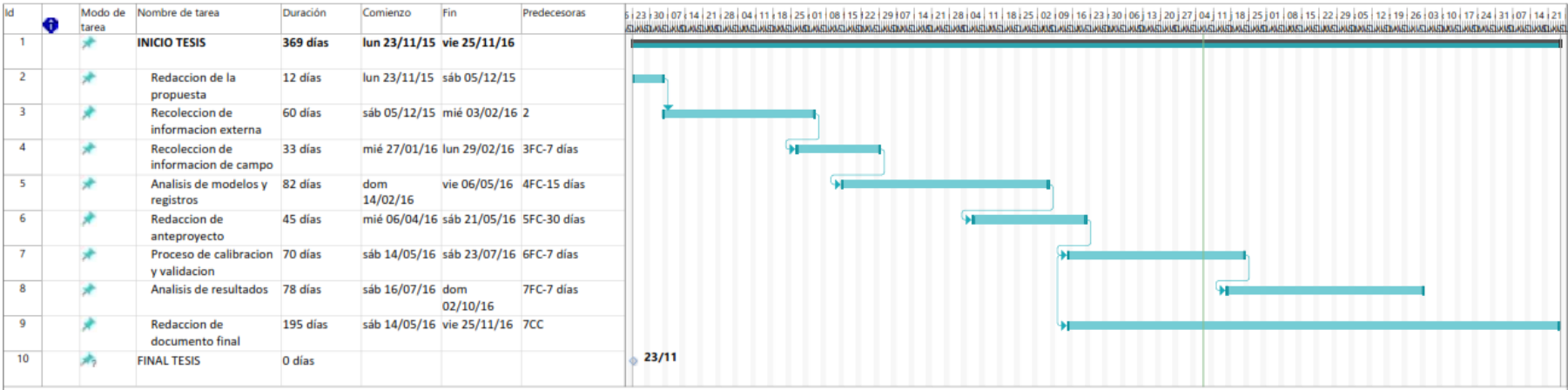


Tabla 25. Cronograma de actividades.
FUENTE: Propia.

14. PRESUPUESTO

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR.TOTAL
1	Mediciones	GI	1	\$ 220.000	\$ 220.000
2	Movilización	Mes	12	\$ 180.000	\$ 2.160.000
3	Gastos en alimentación en reuniones	Mes	12	\$ 80.000	\$ 960.000
4	Gastos en papelería	GI	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Costo Total					\$ 3.540.000

Tabla 26. Presupuesto del proyecto.

FUENTE: Propia.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Barranquilla. Distrito Especial, Industrial y Portuario. (23 de Noviembre de 2010). *Alcaldía de Barranquilla. Distrito Especial, Industrial y Portuario*. Recuperado el 08 de Septiembre de 2016, de http://www.barranquilla.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=28&Itemid=119
- Breña, A. & Jacobo, M. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Ciudad de México, México: Casa abierta al tiempo.
- Cea, L. (2008). Modelación matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. *Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial*. Madrid.
- Chereque, W. (s.f.). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería civil*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Concejo de Barranquilla. (05 de Abril de 2016). *Plan de desarrollo de Barranquilla*. Obtenido de <http://www.concejodebarranquilla.gov.co/descargas/Articulado-PDB-05-ABRIL-2016-IMPRESION-CONCEJO.pdf>
- De la Lanza, G., Cáceres, C., Adame, S. & Hernández, S. (1999). *Diccionario de hidrología y ciencias afines*. Plaza y Valdés Editores.

- El Heraldo. (19 de 04 de 2013). *Comenzó a llover en Barranquilla*. Recuperado el 05 de 12 de 2016, de <http://www.elheraldo.co/local/comenzo-a-llover-en-barranquilla-107438>
- Environmental Protection Agency. (2005). *Manual del usuario SWMM 5.0*. Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos.
- Foro Hídrico. (2016). *Fondo de Restauración, Obras e Inversiones Hídricas*. Recuperado el 08 de Septiembre de 2016, de <http://www.forohidrico.gov.co/index.php/arroyos-de-barranquilla>
- Gieck, K. (1981). *Manual de Fórmulas Técnicas*. Rep y Servicios de Ingeniería S.A. México D.F.
- Gorgas, J., Cardiel, N. & Zamorano, J. (2011). *Estadística básica para estudiantes de ciencia*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2010). *Geoportal-IGAC*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de <http://geoportal.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=23&title=Catastro%20Nacional>
- Mendez, M. (2012). Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM en cuencas hidrográficas de alta pendiente en Costa Rica.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). *Ministerio de ambiente*. Recuperado el 08 de Septiembre de 2016, de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1986-sistema-de-informacion-del-recurso-hidrico-sirh-2#resoluciones>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). *Ministerio de Salud y Protección Social*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2016, de <https://www.minsalud.gov.co/salud/publica/PI/Paginas/patrones-crecimiento-ninos-adolescentes.aspx>
- Montero, L. & Sánchez, S. (2015). *Estudio para la implementación de los SUDS a partir de la modelación hidrológica de las corrientes pluviales superficiales*

urbanas en la ciudad de Barranquilla. Caso arroyo de la Carrera 65.
Barranquilla.

Nania Escobar, L. (1999). *Metodología número-experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles.* Barcelona.

Clipnode. (2015). *RfreeNet Web Manager*. Obtenido de
http://rfreenet.balmart.es/rfreenet2/index.php?opcion_idioma=es

Rodríguez, A. (2013). *Universidad de Zaragoza*. Recuperado el 08 de Agosto de 2016, de <http://zaguan.unizar.es/record/10163/files/TAZ-PFC-2013-096.pdf>

Sánchez, L. (2009). Modelo hidrológico- hidráulico para evaluar un sistema de drenaje urbano en zonas planas.

Soto, M. (2001). *Calibración de dos modelos de simulación integral de cuenca, para la hoya hidrográfica del río Purapel, estación Nirivilo.* Talca-Chile.

Streeter, V.L; Wylie, E.B. (1979). *Mecánica de los fluidos.* México D.F : McGraw-Hill.

Universidad de Murcia. (2008). Obtenido de Estimación de parámetros, validación de modelos y análisis de sensibilidad:
<http://ocw.um.es/ciencias/modelizacion-de-sistemas-ambientales/material-de-clase-1/msa-cap-06.pdf>